
Evaluation der Schallimmissionen neuartiger operationeller Schleppverfahren für Flugzeuge

Sound immission evaluation of novel dispatch towing operations for aircraft

Vom Fachbereich Maschinenbau an der
Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

vorgelegt von

Katja Hein, M. Sc.

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Uwe Klingauf
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer

Tag der Einreichung: 16. April 2019
Tag der mündlichen Prüfung: 03. Juli 2019

Darmstadt 2019

D 17

Bitte zitieren Sie dieses Dokument als:

URN: [urn:nbn:de:tuda-tuprints-113466](https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:tuda-tuprints-113466)

URL: <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/id/eprint/11346>

Dieses Dokument wird bereitgestellt von tuprints,

E-Publishing-Service der TU Darmstadt

<http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de>

tuprints@ulb.tu-darmstadt.de



Die Veröffentlichung steht unter folgender Creative Commons Lizenz:

Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitung 4.0 International

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Kurzfassung

Fliegen wird immer beliebter. Stetig steigende Flugbewegungszahlen führen jedoch auch zu einer Zunahme der ökologischen Belastung, die von einem Flughafen ausgeht. Dabei fühlen sich Anwohner vor allem durch den dadurch entstehenden Lärm belästigt. Die neuartige Schlepper-Technologie TaxiBot ermöglicht mit dem sogenannten operationellen Schleppen, Flugzeugbewegungen am Boden ohne den Schub der Triebwerke einzusetzen. Dies verspricht eine Reduzierung des Bodenlärms.

Die vorliegende Dissertation untersucht und bewertet das neue operationelle Schleppverfahren hinsichtlich der akustischen Auswirkungen und im Vergleich zum konventionellen Rollen mittels Triebwerkschub. Dies erfolgt am Beispiel des Flughafens Frankfurt am Main. Dazu wird in einem ersten Schritt mithilfe einer Anwohnerbefragung gezeigt, dass nicht nur Fluglärm, sondern auch der Lärm von am Boden rollenden Flugzeugen belästigend wahrgenommen wird. Folglich ist das Thema Bodenlärm, wenn auch nur für eine geringe Anzahl von Menschen, relevant und es besteht Handlungsbedarf. Im nächsten Schritt werden die Schlepp- und Rollverfahren anhand akustischer Messungen miteinander verglichen. Dazu werden Messmethoden aus dem Bereich Straßenverkehr adaptiert und weiterentwickelt. Die Messkampagne belegt eine deutliche Reduzierung des Schalldruckpegels beim operationellen Schleppen. Da die Ergebnisse allerdings nur lokal gültig sind und keine Aussage darüber liefern, ob die Pegelreduzierung auch bei den Anwohnern ankommt, werden Schallausbreitungsberechnungen durchgeführt. Im Rahmen einer Szenarioanalyse werden Verfahrensvarianten des operationellen Schleppens dem konventionellen Rollen gegenübergestellt. Dies erfolgt mithilfe eines eigens dafür implementierten und an eine in Deutschland geltende Berechnungsvorschrift angelehnten Berechnungsprogramms. Die Berechnung der Schallimmissionen zeigt die akustischen Schwächen des operationellen Schleppens auf. Da sich die Stadt Kelsterbach in unmittelbarer Nähe der Abkoppelpositionen befindet, auf denen Flugzeug und TaxiBot voneinander getrennt und die Triebwerke gestartet werden, bewirkt dies eine Pegelzunahme im angrenzenden Stadtgebiet.

Die Untersuchungen dieser Arbeit zeigen, dass sich die zunächst erwartete Entlastung der Anwohner, zumindest für den Fall Frankfurt, nicht bewahrheitet. Dennoch sind Konstellationen an anderen Flughäfen denkbar, wo dies der Fall sein könnte. Hierfür sind gesonderte und individuelle Untersuchungen erforderlich.



Abstract

Flying is becoming more and more popular. However, the constantly increasing number of aircraft movements also leads to an increase in the ecological impact of an airport. The residents feel particularly disturbed by the resulting noise. The innovative tug technology TaxiBot enables a new procedure, which is called operational towing and allows aircraft movements without using the engines' thrust. This promises a reduction in ground noise.

The dissertation at hand examines and evaluates the new operational towing procedure with regard to the acoustic effects and in comparison to conventional taxiing by means of engine thrust. This is done using Frankfurt am Main Airport as an example. In a first step, a survey of local residents shows that not only flight noise, but also noise of aircraft taxiing on the ground is perceived as annoying. As a result, the issue of ground noise is of relevance, albeit only to a small number of people, and there is a need for action. In the next step, the towing and taxiing procedures are compared using acoustic measurements. For this purpose, measurement methods from the field of road traffic are adapted and further developed. The measurement campaign proves a significant reduction of the sound pressure level during operational towing. However, since the results are only valid locally and do not provide any information as to whether the level reduction also reaches the residents, sound propagation calculations are carried out. Within the framework of a scenario analysis, procedural variants of operational towing are compared with conventional taxiing. This is done with the aid of a calculation program implemented specifically for this purpose and which is based on a calculation method currently used in Germany. The calculation of the sound immissions shows the acoustic weaknesses of the operational towing procedure. Since the city of Kels-terbach is located in the immediate vicinity of the decoupling positions, where the aircraft and TaxiBot are separated from each other and the engines are started, this causes a sound pressure level increase in the adjacent city area.

The investigations of this work show that the initially expected improvement in the situation of residents, at least in the case of Frankfurt, does not prove to be true. Nevertheless, constellations at other airports are conceivable where this could be the case. Separate and individual investigations are required for this purpose.



Danksagung

Die vorliegende Dissertation ist während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik (FSR) der Technischen Universität Darmstadt entstanden. Die Arbeit an spannenden Forschungsprojekten, insbesondere am Projekt Airport eMove, ermöglichte es mir, meine bis dahin erworbenen Kenntnisse auszubauen sowie die hier präsentierte Forschung durchzuführen. Besonderer Dank gilt Professor Dr.-Ing. Uwe Klingauf, der mir als Institutsleiter diese Möglichkeit geboten und mich durch seine Betreuung und sein Vertrauen in den Jahren der Entstehung dieser Dissertation unterstützt hat. Zudem danke ich Professor Dr.-Ing. Heinz-Peter Schiffer des Instituts für Gasturbinen, Luft- und Raumfahrtantriebe (GLR) der Technischen Universität Darmstadt für die Übernahme des Korreferats und die kritische Auseinandersetzung mit meinem Thema.

Ich möchte mich auch bei allen Projektpartnern, -unterstützern und -förderern für die hervorragende Zusammenarbeit im Forschungsprojekt Airport eMove bedanken. Ganz besonders hervorzuheben sind hier Sven Meyenburg, Jutta Ziemer, Michael Doll und Gerhard Baumgarten.

Ich bedanke mich darüber hinaus bei allen Kolleginnen und Kollegen, die mich in den Jahren am Institut begleitet haben. Durch die zahlreichen fachlichen (und fachfernen) Diskussionen habt ihr mich in meiner Forschung unterstützt und die Zeit am Institut abwechslungsreich und unvergesslich gemacht. Für die wertvolle Unterstützung und Beratung hinsichtlich der Dokumentation und Präsentation meiner Ergebnisse danke ich insbesondere Christoph Anger, Torben Bernatzky, Millie Sterling, Martin Michel, Stefan Neis, Sebastian Sprengart und Jonas Schulze.

Eine weitere wichtige Säule meiner Arbeit stellt die Zusammenarbeit mit Studierenden der Universität dar. Hier möchte ich besonders die Beiträge von Sebastian Baumann und Benjamin Stauder hervorheben.

Abschließend danke ich meiner Familie und meinen Freunden, die mich immer unterstützen, verständnisvoll sind und ein offenes Ohr für mich haben. Meinen Eltern Valeri und Nina Hein, meiner Schwester Anna Stehl und besonders meinem Freund Christoph Anger danke ich für die unermüdliche Unterstützung und Geduld in allen Phasen der Promotion und darüber hinaus.



Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1. | Motivation | 1 |
| 1.2. | Ziele der Arbeit | 3 |
| 1.3. | Struktur der Arbeit | 4 |
| 2 | Stand der Technik im Bereich operationeller Schleppverfahren und akustische Grundlagen | 7 |
| 2.1. | TaxiBot-Technologie | 7 |
| 2.2. | Gegenüberstellung der Verfahren konventionelles Rollen und operationelles Schleppen | 9 |
| 2.3. | Definition des Flughafennahbereiches | 11 |
| 2.4. | Akustische Grundlagen | 12 |
| 2.5. | Schallabstrahlung des Triebwerks | 15 |
| 2.6. | Lärm | 16 |
| 2.6.1. | Bodenlärm | 16 |
| 2.6.2. | Mess- und Beurteilungsgrößen | 18 |
| 2.6.3. | Wahrnehmung von Lärm | 18 |
| 3 | Anwohnerbefragung zur Wahrnehmung von Bodenlärm | 21 |
| 3.1. | Forschungsfragen und Hypothesen | 21 |
| 3.2. | Befragungsmethodik | 23 |
| 3.2.1. | Konzeptionierung der Befragung | 23 |
| 3.2.2. | Vortest | 26 |
| 3.2.3. | Planung der Befragung | 26 |
| 3.2.4. | Durchführung und Beobachtungen | 31 |
| 3.2.5. | Datenaufbereitung | 32 |
| 3.3. | Befragungsergebnisse | 32 |
| 3.3.1. | Beschreibung der Stichproben | 32 |
| 3.3.2. | Auswertung der Fragebögen | 36 |
| 3.3.3. | Einfluss von Störvariablen | 44 |

| | |
|--|----|
| 3.4. Diskussion der Befragungsergebnisse | 45 |
| 3.4.1. Interpretation | 45 |
| 3.4.2. Inhaltliche Bewertung | 47 |
| 3.4.3. Methodische Bewertung | 49 |
| 3.4.4. Zusammenfassung und Zwischenfazit | 51 |

4 Akustische Messungen zur Untersuchung operationeller Schleppverfahren 53

| | |
|---|----|
| 4.1. Analyse der Anforderungen an die akustischen Messungen | 53 |
| 4.2. Messmethodik | 54 |
| 4.2.1. Konzeptionierung der Messkampagne | 55 |
| 4.2.2. Messequipment und Messaufbau | 60 |
| 4.2.3. Vortests | 63 |
| 4.2.4. Planung der Messkampagne | 66 |
| 4.2.5. Durchführung der Messkampagne | 68 |
| 4.2.6. Datenaufbereitung | 70 |
| 4.3. Messergebnisse | 71 |
| 4.3.1. Meteorologische Daten | 71 |
| 4.3.2. Vorbeifahrtgeräusch | 71 |
| 4.3.3. Standgeräusch | 81 |
| 4.4. Diskussion der Messergebnisse | 83 |
| 4.4.1. Interpretation | 83 |
| 4.4.2. Methodische Bewertung | 87 |
| 4.4.3. Zusammenfassung und Zwischenfazit | 89 |

5 Schallimmissionsberechnung zur Untersuchung operationeller Schleppverfahren 91

| | |
|---|-----|
| 5.1. Modellbildung und Implementierung der Schallimmissionsberechnung | 91 |
| 5.1.1. Eingangsgrößen | 94 |
| 5.1.2. Berechnungsmethode | 97 |
| 5.1.3. Modellbildung | 105 |
| 5.1.4. Ausgangsgröße | 109 |
| 5.2. Verifikation des Berechnungsprogramms | 110 |
| 5.3. Exemplarische Untersuchung der Abrollvorgänge am Flughafen Frankfurt | 113 |
| 5.3.1. Beschreibung der Vergleichsszenarien | 113 |
| 5.3.2. Implementierung der Schallimmissionsberechnung für den Flughafen Frankfurt | 115 |
| 5.4. Ergebnisse der Schallimmissionsberechnungen | 122 |
| 5.5. Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse | 128 |

| | |
|---|------------|
| 5.6. Diskussion der Berechnungsergebnisse | 130 |
| 5.6.1. Interpretation | 131 |
| 5.6.2. Methodische Bewertung | 133 |
| 5.6.3. Zusammenfassung und Zwischenfazit | 134 |
| 6 Zusammenfassung und Ausblick | 135 |
| 6.1. Zusammenfassung | 135 |
| 6.2. Ausblick | 137 |
| Literaturverzeichnis | 138 |
| A Anhang zu Kapitel 3 | 147 |
| A.1. Fragebogen zur Anwohnerbefragung | 147 |
| A.2. Vergleich von Messwerten zur Auswahl der Stichprobe | 154 |
| B Anhang zu Kapitel 4 | 157 |
| B.1. Anforderungen an die akustischen Messungen | 157 |
| B.2. Mitnahmeliste Messkampagne | 161 |
| B.3. Zeitplan Messkampagne | 163 |
| B.4. Messprotokolle | 164 |
| B.5. Berechnung des Schalldruckmittelungspegels nach VDI 3723 | 165 |
| B.6. Schalldruckpegel Goldhofer AST-2 | 167 |
| B.7. Berechnung der Oktavschalldruckpegel nach AzB | 168 |
| B.8. Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM:1995 | 173 |
| C Anhang zu Kapitel 5 | 179 |
| C.1. Beschreibung der Abflug-Rollwege | 179 |
| C.2. Luftfahrzeuggruppen nach AzB | 180 |
| C.3. Streckenbelegung und APU-Einsätze | 181 |
| C.4. Sonstige Größen | 182 |
| C.5. Dauer des Triebwerkstarts | 183 |
| C.6. APU-Oktavschalldruckpegel | 184 |
| C.7. Datenaufbereitung der Flugbewegungstabelle | 185 |
| C.8. Weitere Ergebnisse der Schallimmissionsberechnung | 186 |



Symbole und Abkürzungen

Symbole

| | |
|--------------|---|
| A_n | Frequenzkorrektur für die A-Bewertung für das n -te Oktavband |
| α | Höhenwinkel |
| d_n | Absorptionskoeffizient |
| $D_{I,n}$ | Richtwirkungsmaß für das n -te Oktavband |
| $D_{L,n}$ | Luftabsorptionsmaß für das n -te Oktavband |
| D_s | Abstandsmaß |
| D_V | Geschwindigkeitsmaß |
| $D_{Z,n}$ | Bodendämpfungsmaß für das n -te Oktavband |
| D_Ω | Raumwinkelmaß |
| δ | Eingangsgröße |
| Δ | Differenz zweier Größen |
| Δf | Filterbreite |
| Δt | Zeitdauer |
| ΔL_K | Korrekturpegel |
| E | Schallexposition |
| f | Frequenz |
| f_m | Filtermittenfrequenz |
| g_r | Gewichtsfaktor |
| G_n | asymptotische Pegelminderung |
| h_Q | Quellhöhe |
| h_r | Höhe des Mikrofons über dem Boden |
| h_s | Höhe der Schallquelle über dem Boden |
| I | Schallintensität |
| l | Länge |
| L | Pegel |
| $L_{eq}(3)$ | energieäquivalenter Dauerschallpegel |
| $L_p(t)$ | momentaner Schalldruckpegel |
| L_r | Beurteilungspegel |
| $L_x^{(i)}$ | Messwerte |
| $L_{x;m}$ | Schalldruckmittlungspegel |

| | |
|--|---|
| n | Anzahl |
| N_{Lk} | Anzahl der Luftfahrzeugklassen |
| N_{Ts} | Anzahl der Teilstücke eines Rollwegs |
| N_{Rw} | Anzahl der Rollwege |
| O | Ursprungspunkt des Bezugsquaders |
| O_n | Oktavschalldruckpegel |
| $O_{n,\text{Hintergrund}}$ | Oktavschalldruckpegel des Hintergrundgeräusches |
| p | Schalldruck |
| \bar{p} | Effektivwert des Schalldrucks |
| $p(t)$ | momentaner Schalldruck bei Laufzeit t |
| P | Schalleistung |
| P | Immissionsort |
| q | Äquivalenz- oder Halbierungsparameter |
| Q | Quellpunkt |
| Q₀ | Fußpunkt des vom Immissionsort P auf ein Rollwegsegment gefallten Lots |
| Q_i | Quellpunkt der Teilstücks i |
| r | Abstand zwischen Mikrofon und Schallquelle (2D) |
| r_0 | kürzester Abstand eines Immissionsortes |
| ρ | Lot-Koordinate |
| s | Ausbreitungsentfernung (3D) |
| s_i | Abstand, des das Rollwegsegment repräsentierenden Quellpunktes Q_i vom Immissionsort P |
| s_{O_n} | Bezugsentfernung für den Oktavschalldruckpegel O_n |
| $s_{\text{pass}}(L_{\Sigma,\text{max}})$ | zum Zeitpunkt des maximalen Summenpegels zurückgelegte Wegstrecke |
| σ | Bogenlängenkoordinate |
| t | Zeit |
| $t(L_{\Sigma,\text{max}})$ | Zeitpunkt, an der maximale Summenpegel erreicht wird |
| t_{n-1} | Studentfaktor |
| $t_{\text{Pos_blockiert_bis}}$ | Zeitpunkt, bis zu dem die Abkoppelposition von einem Flugzeug-Schlepper-Gespann blockiert ist |
| $t_{\text{Pos_blockiert_von}}$ | Zeitpunkt, ab dem die Abkoppelposition von einem Flugzeug-Schlepper-Gespann blockiert ist |
| T | Periodendauer, Messdauer |
| T_{E} | Erhebungszeit |
| T_{r} | Beurteilungszeit |
| τ | Zeitkonstante |
| θ | Schalleinfallswinkel |

| | |
|-------------------|-----------------------------|
| v | Schallschnelle |
| v_{Pass} | Vorbeifahrtgeschwindigkeit |
| w | Schallenergiedichte |
| x_s | x-Position der Schallquelle |
| y_s | y-Position der Schallquelle |
| Z | Zusatzpegel |

Indizes

| | |
|-----------|--|
| / | längenbezogen |
| o | Bezugsgröße |
| A | A-Frequenzbewertung |
| ALUT | Actual Line-up Time |
| ATD | Actual Time of Departure |
| Boden | durch Bodenoperationen entstehende Schallimmissionen |
| Checks | Abarbeiten einer Checkliste |
| dn | 24-Stunden-Beurteilungspegel (Day-Night) |
| DQT | Departure Queuing Time |
| DT | Dispatch Towing |
| eq | energieäquivalent |
| E | Einzelereignis |
| fremd | Unsicherheiten von Fremdgeräuschen |
| F | Stör- bzw. Fremdgeräusch oder Frequenzbewertung Fast |
| gem | gemessen |
| G | Gesamtgeräusch |
| i | Index $i = 1, 2, 3, \dots$; Teilstück |
| instr | Unsicherheiten des Messsystems |
| k | Luftfahrzeugklasse |
| Kal,op | Kalibratorpegel unter Betriebsbedingungen |
| Kal,ref | Kalibratorpegel unter Bezugsbedingungen |
| Kernnacht | Kernnacht |
| l | Abstellposition; Rollweg |
| lin | Pegellinearität |
| m | Mittelung |
| m | Teilstück |
| max | maximal |
| mic | Mikrofon |
| mic,s | Ungenauigkeiten des Mikrofonabstands |

| | |
|---------------|---|
| n | laufende Oktavbandnummer |
| Nacht | Nacht (22 Uhr bis 06 Uhr) |
| o | obere Grenze |
| p | Schalldruck |
| PCM/DCM | Wechsel von Pilot Control Mode in Driver Control Mode |
| RH | Luftfeuchtigkeit |
| Roll | durch Rollbewegungen entstehende Schallimmissionen |
| Rundung | Unsicherheiten des Rundens auf eine Nachkommastelle |
| Stativ | Wellenreflexion des Stativs |
| Σ | Summe |
| T | Umgebungstemperatur |
| Tag | Tag (06 Uhr bis 22 Uhr) |
| T_r | Beurteilungszeit |
| TW-Start | Triebwerkstart |
| TW-Warmlaufen | Warmlaufen der Triebwerke |
| u | untere Grenze |
| U | Spannungsversorgung |
| Unloading | Entkoppeln von TaxiBot und Flugzeug |
| v | Unsicherheiten der Vorbeifahrtgeschwindigkeit |
| w | Schallleistung |

Statistische Größen

| | |
|---------------|--|
| a_o | obere Grenze des Unsicherheitsintervalls |
| a_u | untere Grenze des Unsicherheitsintervalls |
| α | Reliabilität |
| α_k | Signifikanzniveau bei einer Anzahl k Paarvergleichen |
| H | Teststatistik des Kruskal-Wallis-Tests |
| IQA | Interquartilsabstand |
| J | Teststatistik des Jonckheere-Terpstra-Tests |
| k | Anzahl der Paarvergleiche |
| Mdn | Median |
| n | Anzahl der unabhängigen Messwerte |
| N | Gesamtstichprobengröße |
| p | statistische Signifikanz |
| r | Effektstärkenmaß |
| R^2 | Bestimmtheitsmaß |
| s oder SD | Standardabweichung |

| | |
|----------|---|
| u | Standardunsicherheit |
| u_c | kombinierte Standardunsicherheit des gemessenen Schalldruckpegels |
| U | Teststatistik des Mann-Whitney-Tests |
| U | erweiterte Messunsicherheit |
| χ^2 | Teststatistik des Chi-Quadrat-Tests |
| z | z-Wert |

Abkürzungen

| | |
|------------|--|
| 1. FlugLSV | Erste Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm |
| AETO | All-Engine Taxi-out |
| ALUT | Actual Line-up Time |
| AP | Abstellposition |
| APU | Auxiliary Power Unit |
| ATD | Actual Time of Departure |
| AzB | Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen |
| AzD | Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb |
| BImSchV | Bundes-Immissionsschutzverordnung |
| BMVI | Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur |
| BNC | Bayonet Neill Concelman |
| CAT | Category |
| DCM | Driver Control Mode |
| DES | Datenerfassungssystem |
| DFLD | Deutscher Fluglärmdienst |
| DFS | Deutsche Flugsicherung |
| DGM | Digitales Geländemodell |
| DLR | Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt |
| DQT | Departure Queuing Time |
| DT | Dispatch Towing |
| FFT | Fast Fourier Transformation |
| FH | Fachhochschule |
| FluLärmG | Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm |
| FSR | Fachgebiet Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt |
| GPU | Ground Power Unit |
| GUM | Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement |
| HMWEVL | Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und |

| | |
|---------|--|
| | Landesentwicklung |
| HS | Hochschule |
| IAI | Israel Aerospace Industries |
| ICBEN | The International Commission on the Biological Effects of Noise |
| IP | Immissionspunkt |
| LEF | Lärmempfindlichkeitsfragebogen |
| LEF-K | Kurzversion des Lärmempfindlichkeitsfragebogens |
| LEOS | Lufthansa Engineering and Operational Services |
| LHT | Lufthansa Technik |
| Lk | Luftfahrzeugklasse |
| LuftSiG | Luftsicherheitsgesetz |
| NoiSeQ | Noise-Sensitivity-Questionnaire |
| OFB | Off-Block Time |
| PCM | Pilot Control Mode |
| Rw | Rollweg |
| SzM | Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt |
| TEDS | Transducer Electronic Data Sheet |
| Ts | Teilstück |
| TW | Triebwerk |
| UBA | Umweltbundesamt |
| UTM | Universal Transverse Mercator |
| VDI | Verein Deutscher Ingenieure |

1 Einleitung

Im Rahmen dieser Arbeit wird ein neuartiges operationelles Schleppverfahren für Flugzeuge akustisch untersucht und mit dem heutigen Rollen mittels Triebwerkschub verglichen. Die hierfür weiterentwickelten Methoden ermöglichen eine Bewertung des neuen Verfahrens hinsichtlich der entstehenden Schallimmissionen.

Das erste Kapitel gibt einen Überblick über die Bedeutung der Thematik und die in der Arbeit untersuchten Forschungsfragen. Zunächst wird die Motivation der Untersuchung dargelegt. Anschließend folgen die wesentlichen Ziele sowie ein Überblick über die Struktur der Arbeit.

1.1 Motivation

„Die Zahl der Flüge in Deutschland steigt – und das mit zunehmender Geschwindigkeit: Zum fünften Mal in Folge lag die jährliche Steigerungsrate über der des Vorjahres.“ [1]

Deutschlandweit wurden 2018 von der Deutschen Flugsicherung (DFS) insgesamt 3.346.448 Flüge nach Instrumentenflugregeln registriert, davon waren 2.297.425 Starts und Landungen. Dies ist ein Anstieg um 4 % im Vergleich zum Vorjahr. [2] Der Flughafen Frankfurt am Main verzeichnet sogar einen Zuwachs von 7,7 % [2]. Hier starten und landen täglich ca. 1.400 Flugzeuge. Im Jahr 2018 summierten sich die Starts und Landungen auf 512.115 Flugbewegungen [3] - eine beachtliche Verkehrsleistung und ein wirtschaftlicher Erfolgsfaktor für die Region Rhein-Main.

Der ökonomische Erfolg bringt jedoch auch eine ökologische Belastung und einen hohen Treibstoffverbrauch mit sich. Denn ohne, dass ein Flugzeug auch nur einen Passagier oder eine einzige Palette Fracht in die Luft gebracht hat, entstehen bereits am Boden Lärm und Abgase durch die laufenden Triebwerke. Das Rollen mittels Triebwerkschub ist sehr ineffizient, da die für den Vortrieb genutzten Flugzeugtriebwerke für das Fliegen in großen Höhen ausgelegt sind und daher einen schlechten Wirkungsgrad am Boden aufweisen. Dem soll eine neue Flugzeugschlepper-Technologie (*TaxiBot*) und damit ermöglichte Änderungen in den operationellen Prozessen am Flughafen entgegenwirken. Entscheidend dafür ist, dass die Triebwerke am Boden nicht länger als unbedingt notwendig laufen.

Allein ein Warmlaufen unmittelbar vor dem Start des Flugzeugs für ca. ein bis drei Minuten ist erforderlich [4].

Derzeit beschränkt sich das Schleppen von Flugzeugen lediglich auf Pushbacks¹ und Wartungsschlepps. Dem Verwenden von Flugzeugschleppern für den Rollvorgang spricht bisher entgegen, dass konventionelle Schlepper aufgrund von technischen Voraussetzungen nur für kurze Distanzen und bei geringen Geschwindigkeiten verwendet werden können (Pushback) oder nur leere Flugzeuge über längere Strecken bewegen dürfen (Wartungsschlepp). Zudem ist der Pilot während des Rollvorgangs für das Flugzeug verantwortlich, sodass es rechtlich nicht möglich ist, die Steuerung des Flugzeug-Schlepper-Gespans an den Schlepperfahrer zu übertragen. Mithilfe des neuartigen Flugzeugschleppers TaxiBot ist es jedoch möglich, mit einem vollbeladenen Flugzeug Geschwindigkeiten konventionell rollender Flugzeuge zu erreichen. Des Weiteren behält der Pilot die Kontrolle über das Flugzeug, da er den Schlepper über Bewegungen des Flugzeugbugrads steuern kann. Eine Betätigung der Flugzeugbremsen wird ebenfalls vom TaxiBot registriert. Mit dieser Technologie wird das sog. *operationelle Schleppen* ermöglicht. Dabei wird das Flugzeug mittels Schlepper zu einer Abkoppelposition in der Nähe des Startbahnkopfes befördert und die Triebwerke im Idealfall erst dann gestartet, wenn das Flugzeug vom Schlepper entkoppelt wird. Abbildung 1.1 zeigt ein solches Gespann aus TaxiBot und einem Flugzeug des Typs Boeing B737. Auf weitere technische Details zum TaxiBot wird in Abschnitt 2.1 eingegangen. Im Rahmen des Projekts *Airport eMove*² wurde der TaxiBot am Flughafen Frankfurt in enger Zusammenarbeit mit dem Fahrzeugentwickler Israel Aerospace Industries (IAI) zertifiziert, im operationellen Betrieb erprobt (November 2014 bis Oktober 2016) und verbessert.

Neben einer Reduzierung des Treibstoffverbrauchs ist ein wichtiges Ziel, den durch rollende Flugzeuge emittierten Schall zu reduzieren und benachbarte Städte zu entlasten. Zusätzlich wird damit ein wichtiger Schritt zur Erreichung des im EU-Strategiepapier Flightpath 2050 definierten Ziels emissionsfreier Flugzeugbewegungen am Boden geleistet [8].

Die Relevanz des Themas *Bodenlärm* ist nach derzeitigem Stand der Forschung jedoch unklar. Dem Beitrag des Bodenlärms an den Gesamtlärmemissionen eines

¹ Bei einem Pushback wird das vollbeladene Flugzeug mithilfe eines Flugzeugschleppers von seiner Parkposition auf den Rollweg zurückgedrückt. Die Geschwindigkeit des Flugzeugschleppers liegt im Bereich von 5 km/h bis 10 km/h. [5]

² Das Forschungs- und Entwicklungsprojekt Airport eMove - Elektromobiles Rollen und Schleppen zur Verringerung von Bodenlärm und Kerosin-Verbrauch wurde vom Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI) gefördert. Es wurde als Kooperationsprojekt von den Partnern Deutsche Lufthansa AG, Lufthansa Technik AG, Lufthansa Engineering and Operational Services GmbH (LEOS) und dem Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik der TU Darmstadt durchgeführt (vgl. [6, 7]).



Abbildung 1.1.: Gespann aus TaxiBot und einem Flugzeug des Typs Boeing B737.
[Quelle: S. Meyenburg, Lufthansa LEOS]

Flughafens wird in der Literatur nur eine geringe Bedeutung zugewiesen. Wenn überhaupt, wird ein geringfügiger Einfluss im Nahbereich der Flughafens benannt (vgl. [9, S. 45]). Zu diesem Schluss kommt beispielsweise auch die schalltechnische Untersuchung zum Planfeststellungsverfahren für eine dritte Start- und Landebahn für den Flughafen München aus dem Jahr 2010 (vgl. [10]). Hier wurden an verschiedenen Immissionsorten Pegelunterschiede zwischen Bodenlärm und Fluglärm von 25 dB(A) und mehr berechnet. Dennoch ist die Berücksichtigung von Rollbewegungen sowie des Betriebs von Flugzeug-Hilfsgasturbinen (Auxiliary Power Unit, APU) bei Schallimmissionsberechnungen gesetzlich vorgeschrieben (vgl. 1. FlugLSV § 2 Abs. 1 [11]). Darüber hinaus gibt es vereinzelte Studien, die darauf hinweisen, dass sich Flughafenanwohner durch Bodenlärm belästigt fühlen (vgl. [12, 13]).

1.2 Ziele der Arbeit

Die Technologie TaxiBot ermöglicht erstmals die Umsetzung eines operationellen Schleppverfahrens als Alternative zum konventionellen Rollen mittels Triebwerkschub. Dadurch verändert sich die Schallsituation an Flughäfen. In einem ersten Schritt soll gezeigt werden, dass nicht nur An- und Abflüge, sondern auch die Geräuschabstrahlung von rollenden Flugzeugen relevant ist und von Anwohnern in der Nähe des Flughafens wahrgenommen wird. Ziel der Arbeit ist es, eine akustische Bewertung des operationellen Schleppens vorzunehmen und damit einen

Beitrag zur Gesamtbewertung der Technologie TaxiBot zu leisten³. Die Auswirkungen auf den Flughafennahbereich sollen untersucht und ein direkter Vergleich zum heutigen Verfahren gezogen werden. Dafür werden Methoden weiterentwickelt, die einerseits eine akustische Bewertung durch Messungen und andererseits eine Untersuchung auf der Grundlage von Schallimmissionsberechnungen ermöglichen. Mit dem Ergebnis dieser Arbeit kann ein Flughafenbetreiber die Auswirkungen einer so grundlegenden Änderung der Rollverfahrens besser beurteilen und gegebenenfalls Maßnahmen daraus ableiten (z. B. Positionierung der Abkoppelbereiche, Einsatz von Schallschutzmaßnahmen).

1.3 Struktur der Arbeit

Die Struktur der Arbeit ist in Abbildung 1.2 dargestellt. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der einzelnen Kapitel in Form von Forschungsfragen zusammengefasst. Die Arbeit umfasst sechs Kapitel. Nach einer Einleitung und Motivation des Themas werden in Kapitel 2 die Grundlagen dargelegt. Es werden die Besonderheiten der TaxiBot-Technologie und des operationellen Schleppverfahrens erläutert. Zudem wird der Begriff Bodenlärm abgegrenzt und die akustischen Grundlagen beschrieben. Die Auswirkungen des neuartigen operationellen Schleppverfahrens werden am Beispiel des Flughafens Frankfurt untersucht. Da die Studiengrundlage nur vereinzelt auf die Relevanz des Themas Bodenlärm schließen lässt, wird vorab eine Befragung im Nahbereich des Flughafens durchgeführt (Kapitel 3). Damit soll geklärt werden, ob Bodenlärm von Anwohnern wahrgenommen wird und überhaupt Bedarf besteht, diesen zu reduzieren. Auf diese Weise wird die Grundlage für die Untersuchungen dieser Arbeit geschaffen. Um die Technologie TaxiBot bewerten zu können, werden zunächst akustische Messungen durchgeführt, die einen direkten Vergleich eines mittels Triebwerkschub rollenden Flugzeugs mit einem vom TaxiBot bewegten Flugzeug ermöglichen (Kapitel 4). Um die Auswirkungen auf das Flughafenumfeld bewerten zu können, werden in Kapitel 5 Schallimmissionen berechnet und eine Szenarioanalyse vorgenommen. Hierbei fließen in die Modellbildung auch Erkenntnisse aus den Messergebnissen ein. Abschließend werden in Kapitel 6 die erzielten Ergebnisse und mögliche zukünftige Arbeiten zusammengefasst.

³ In die Gesamtbewertung des TaxiBots fließen weitere Faktoren, wie Treibstoffeinsparung, Reduzierung von Schadstoffemissionen, Auswirkungen auf Prozesszeiten etc., ein. Diese Aspekte werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, können jedoch in den Projektabschlussberichten nachgeschlagen werden (vgl. [6, 7]).

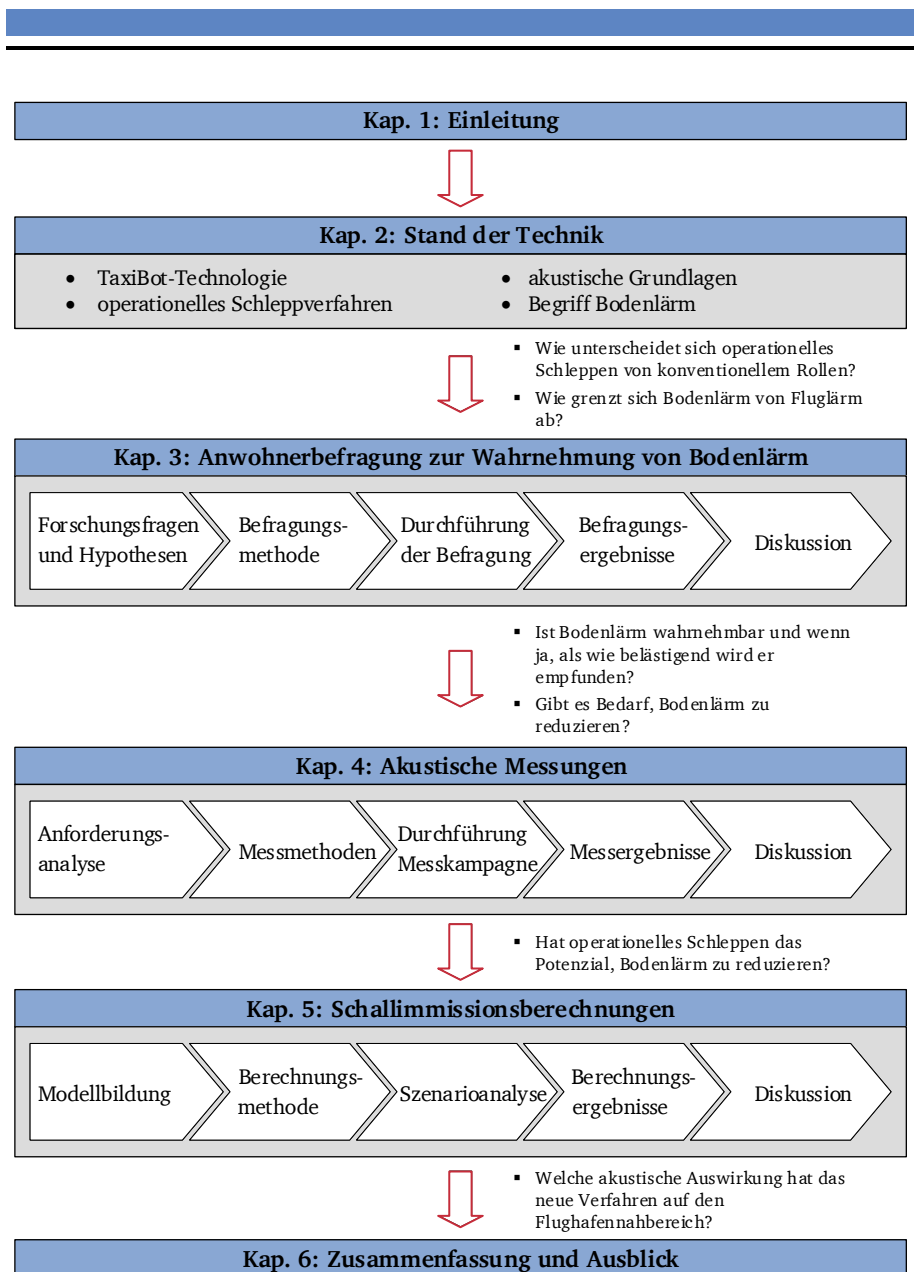


Abbildung 1.2.: Struktur der Arbeit und resultierende Forschungsfragen.



2 Stand der Technik im Bereich operationeller Schleppverfahren und akustische Grundlagen

Mit diesem Kapitel wird die Grundlage für das Verständnis der nachfolgenden Untersuchungen geschaffen. Zunächst wird die TaxiBot-Technologie vorgestellt, die das operationelle Schleppen überhaupt erst ermöglicht. Da sich das neue Verfahren grundlegend vom heutigen Rollen unterscheidet, werden die beiden Verfahren einander gegenübergestellt und Unterschiede aufgezeigt. Das operationelle Schleppen wird in dieser Arbeit anhand einer Fallstudie für den Flughafen Frankfurt untersucht. Daher wird eine räumliche Einordnung des Flughafens vorgenommen und der sog. Flughafennahbereich definiert. Anschließend werden akustische Grundlagen dargelegt. Die Begriffe Schall und Schallentstehung beim Flugzeug werden erläutert und auf die subjektive Form von Schall, nämlich Lärm, eingegangen. Dafür wird zunächst der Begriff Bodenlärm von Fluglärm abgegrenzt und schließlich die Lärmwahrnehmung und -wirkungen beim Menschen beschrieben.

2.1 TaxiBot-Technologie

Der TaxiBot ist ein Flugzeugschlepper, der von der Firma IAI zusammen mit der Lufthansa LEOS und dem Fahrzeugbauer TLD entwickelt wurde (siehe Abbildung 2.1). Es werden zwei Ausführungen unterschieden: der Narrow-Body TaxiBot für das Schleppen von kleineren Flugzeugen, wie der Airbus A318 bis hin zur A321, und der Wide-Body TaxiBot für das Schleppen von größeren Flugzeugen, wie der Boeing 747 und der Airbus A380. Der TaxiBot besitzt serielle Hybridantriebe, die sich aus zwei Dieselmotoren und einem elektrischen Fahrsystem zusammensetzen. Die Elektromotoren werden von zwei Generatoren mit Strom gespeist, die ihre Energie aus den Dieselmotoren beziehen. Der Wide-Body TaxiBot besitzt zwei Scania DC16 V8 Motoren mit jeweils einer Leistung von 566 kW. Der Narrow-Body TaxiBot besitzt zwei Scania DC9 Motoren mit 5 Zylindern, die jeweils eine Leistung von 294 kW haben. Damit erreichen die Schlepper eine Maximalgeschwindigkeit von 23 Knoten (42 km/h). [14]



Abbildung 2.1.: Flugzeugschlepper TaxiBot. [Quelle: Lufthansa LEOS]

Ein typischer Prozessablauf einer TaxiBot-Mission (operationelles Schleppen) ist in Abbildung 2.2 dargestellt und sieht folgendermaßen aus: Auf der Abstellposition wird das zu schleppende Flugzeug mit dem TaxiBot gekoppelt. Dieser Vorgang wird *Loading* genannt und setzt sich wiederum aus dem sog. *Pre-Loading* und *Lifting* zusammen. Beim *Pre-Loading* wird der Schlepper von einem Fahrer an das Bugrad des Flugzeugs gefahren, sodass es von einer Aufnahmevorrichtung umschlossen werden kann. Darauf folgend wird in der *Lifting*-Phase das Bugrad angehoben. Der Fahrer des TaxiBots übernimmt anschließend den Pushback, wobei das Flugzeug rückwärts Richtung Rollweg geschoben wird. Im Gegensatz zum herkömmlichen Pushback mit konventionellen Flugzeugschleppern werden die Haupttriebwerke noch nicht gestartet. Nach Beendigung des Pushbacks schaltet der Fahrer des TaxiBots vom Driver Control Mode (DCM) in den Pilot Control Mode (PCM) und die *TaxiBotting*-Phase beginnt. Dabei wird das Flugzeug vom TaxiBot über Rollwege zur einer Abkoppelposition befördert. Während des TaxiBottings übernimmt der Pilot die Steuerung des TaxiBots über den Tiller. Der TaxiBot verfügt über einen Drehteller, der die Drehbewegung des Bugrads registriert und den Drehwinkel auf dessen Räder überträgt. Der Drehteller ist pendelnd gelagert, damit Relativbewegungen zwischen TaxiBot und Flugzeug möglich sind. Wie ein Automatikauto fährt der TaxiBot konstant vorwärts. Wenn der Pilot die Flugzeugsbremse betätigt, entsteht eine Relativbewegung des Flugzeugs nach hinten und entgegengesetzt der Bewegung des TaxiBots. Der TaxiBot regelt diese Bewegung sofort nach und verzögert ebenfalls. Auf der Abkoppelposition angekommen, übergibt der Pilot die Kontrolle des TaxiBots wieder an dessen Fahrer. Das Bugrad wird in der *Unloading*-Phase wieder heruntergelassen und das Flugzeug entkoppelt. Während des Unloadings können die Haupttriebwerke vom Piloten gestartet werden. Nach dem Warmlaufen der Triebwerke rollt das Flugzeug aus eigener Kraft zur Startbahn. Der TaxiBot fährt nach Beendigung des Schleppvorgangs zu einer Parkposition oder zu einem neuen Schleppauftrag. [15]

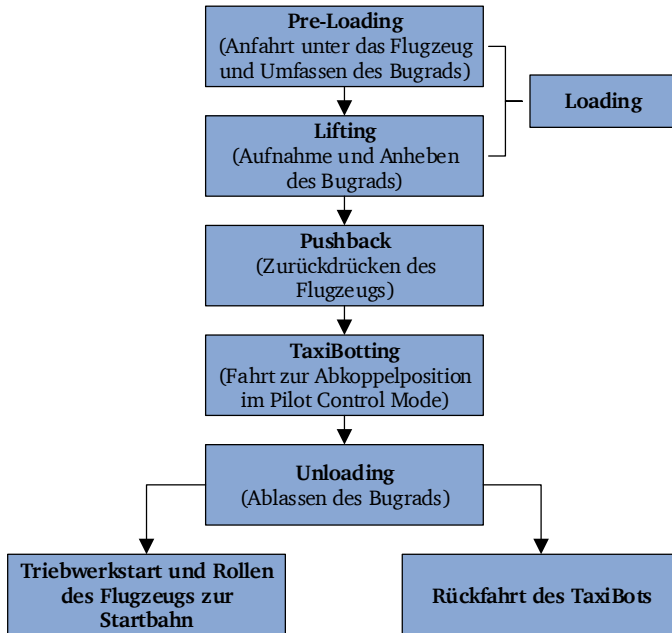


Abbildung 2.2.: Prozessablauf TaxiBot-Mission. [Eigene Darstellung nach [15]]

2.2 Gegenüberstellung der Verfahren konventionelles Rollen und operationelles Schleppen

Eine schematische Darstellung der Schallemissionen sowie Emissionsorte und –dauern beim konventionellen Rollen (im Folgenden auch All-Engine Taxi-out (AETO) genannt) und operationellen Schleppen (im Folgenden auch Dispatch Towing (DT) genannt) ist Abbildung 2.3 zu entnehmen. Sowohl beim AETO als auch beim DT läuft die APU¹, während das Flugzeug auf der Abstellposition steht [17, S. 17].

¹ Die APU befindet sich bei Verkehrsflugzeugen normalerweise im Heckkonus. Sie ist eine autonome Gasturbine, die das Flugzeug von einer externen Druckluft- und Stromversorgung unabhängig macht. Am Boden liefert die APU Luft für den Triebwerkstart und die Klimatisierung des Flugzeugs sowie elektrische Energie für das Bordnetz. Die APU kann allein mit den bordeigenen Batterien eines Flugzeugs gestartet werden und besteht aus zwei Radialverdichtern. Der eine Radialverdichter dient zur APU-Antriebseinheit und der andere zur Druckluftherzeugung für die Klimaanlage bzw. zum Starten der Haupttriebwerke. Die Luft wird über eine seitlich zu öffnende Klappe im hinteren Rumpfbereich angesaugt und das Heißgas aus der Heckspitze wieder ausgeblasen. [16, S. 60f.]

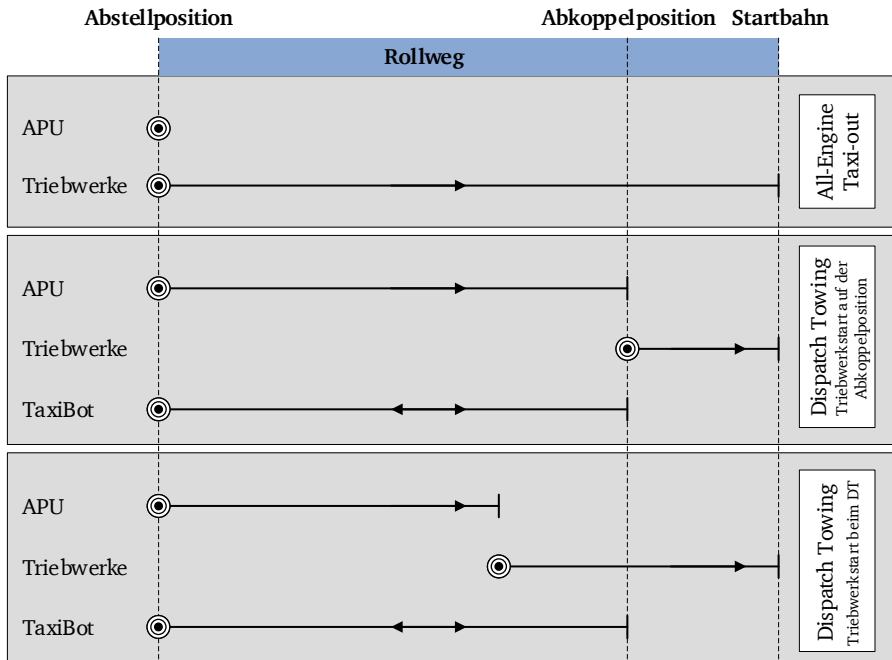


Abbildung 2.3.: Vergleich der Schallemissionen beim All-Engine Taxi-out sowie Dispatch Towing. Darstellung der Emissionsorte und -dauern. [Eigene Darstellung]

Der Triebwerkstart erfolgt beim AETO oft schon während des Pushbacks bzw. nach dem Pushback, wenn das Flugzeug auf der Leitlinie des Rollwegs steht. Die Dauer des gesamten Vorgangs setzt sich aus der Dauer für den Start der Triebwerke und das Abarbeiten einer After Start Checkliste durch die Piloten zusammen. Das Warmlaufen der Triebwerke erfolgt während des Rollens zur Startbahn. Sobald das Flugzeug die Abstellposition verlässt und zum Startpunkt rollt, emittieren die Haupttriebwerke Schall am Boden.

Beim operationellen Schleppen sind zwei Verfahrensvarianten denkbar: Zum einen können die Triebwerke erst auf der Abkoppelposition gestartet werden, zum anderen kann der Triebwerkstart bereits während des Schleppvorgangs erfolgen. Im ersten Fall läuft die APU nicht nur während sich das Flugzeug auf der Abstellposition befindet, sondern auch beim Rollen zur Abkoppelposition. Dies ist notwendig, um die Versorgung mit elektrischer und pneumatischer Energie an Bord des

Flugzeugs sicherzustellen [16, S. 60]. Auf der Abkoppelposition werden die Triebwerke gestartet und laufen, je nach Flugzeugtyp, für ein bis drei Minuten warm. Die Triebwerke emittieren dann auf dem verbleibenden Weg zwischen Abkoppelposition und Startpunkt. Werden die Triebwerke während des DT gestartet, so emittiert nach Verlassen der Abstellposition ebenfalls zunächst die APU. Die Triebwerke werden dann in einer Entfernung von der Abkoppelposition gestartet, die sowohl für das Starten als auch für das Warmlaufen der Triebwerke ausreicht. Der Triebwerkstart erfolgt somit nicht auf einer gesonderten Position, sondern entlang des Rollwegs. In beiden Fällen stellt der TaxiBot eine zusätzliche Schallquelle dar. Dieser emittiert Schall sowohl während des Schleppvorgangs als auch auf der Rückfahrt, nachdem das Flugzeug abgekoppelt wurde.

2.3 Definition des Flughafennahbereiches

Zur räumlichen Einordnung der Flughafens Frankfurt sowie der umgebenden Ortschaften wird ein sog. Flughafennahbereich festgelegt. In einem von der Fraport AG in Auftrag gegebenen Gutachten zur Bewertung des externen Risikos für den Ausbau des Flughafens Frankfurt aus dem Jahre 2001 [18] wird der Flughafennahbereich folgendermaßen definiert:

„Als Flughafennahbereich wird eine Fläche mit einem Radius von 6 km um den Flughafen und 10 km in den An- und Abflugbereichen angesetzt.“ [18, S. 51]

Abbildung 2.4 zeigt den relevanten Flughafennahbereich durch einen vom Flughafenzentrum ausgehenden Kreis mit einem Radius von 7,5 km, da der Flughafen im Norden und Süden eine Breite von jeweils etwa 1,5 km aufweist. Die Ortschaften, die sich innerhalb dieses Radius befinden, sind hervorgehoben. Im Norden des Flughafens Frankfurt handelt es sich hierbei um Kelsterbach, Okriftel, Hattersheim, Sindlingen sowie Schwanheim und der südliche Teil von Nied und Griesheim. Südlich des Flughafens befinden sich Zeppelinheim und Mörfelden-Walldorf im Nahbereich.

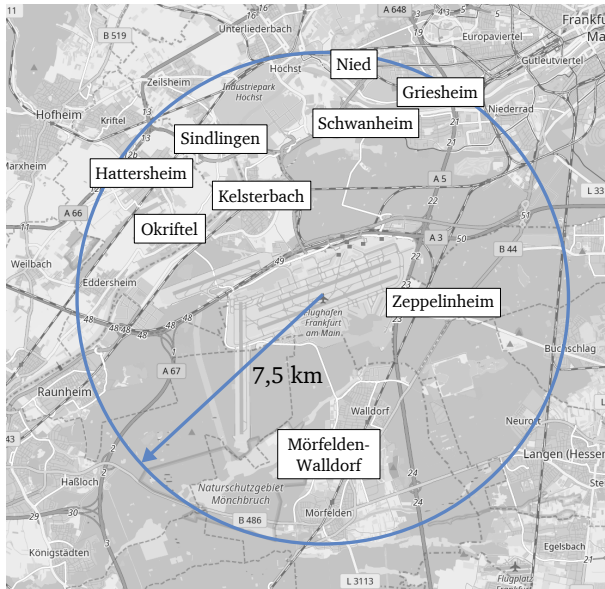


Abbildung 2.4.: Nahbereich des Flughafens Frankfurt. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

2.4 Akustische Grundlagen

Als *Schall* werden mechanische Schwingungen bezeichnet, die im Frequenzbereich von 16 Hz bis 16.000 Hz liegen und damit vom Menschen wahrgenommen werden können [16]. In Abbildung 2.5 ist die Übertragung von Schall dargestellt. Der Begriff *Schallemission* beschreibt den am Emissionsort entstehenden Schall, der z. B. durch eine technische Quelle verursacht wird. Als *Transmission* wird die Ausbreitung des Schalls in einem Medium beschrieben. Hierbei wird zwischen Luftschall, Körperschall und Wasserschall unterschieden. Die *Schallimmission* ist die Schallenergie, die auf einen bestimmten Punkt (Immissionsort) wirkt. Bezieht sich die Schallenergie auf eine Person, wird von Schallexposition gesprochen. Dem schließt sich die Beurteilung des Menschen an, ob es sich bei dem Schallereignis um eine Beeinträchtigung (Lärm) handelt oder nicht. [19]

Da im Rahmen dieser Arbeit nur der vom Gehör direkt wahrzunehmende Luftschall von Interesse ist, konzentrieren sich die folgenden Erläuterungen lediglich auf diesen Bereich. Luftschall entsteht beispielsweise durch Luftverwirbelungen, pulsierende Luftverdrängung oder Schwingungen von Maschinenteilen. Bei letzte-

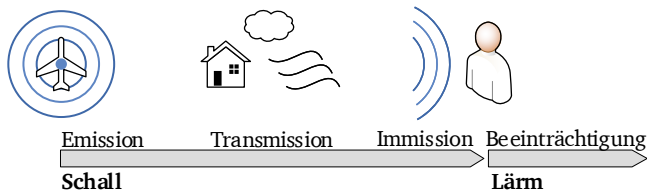


Abbildung 2.5.: Schallübertragung. [Eigene Darstellung nach [19, S. 15]]

rem liegen die Ursachen dafür in dynamisch auftretenden Kräften wie Stößen oder Unwuchten, die die Maschine zu Schwingungen anregen können. Über die Schwingungen der äußeren Flächen kommt es zur Luftschallabstrahlung. In unmittelbarer Nähe der Fläche entsteht eine reine Luftmassenbewegung (Nahfeldbereich). In größerem Abstand, dem Fernfeldbereich, kommt es abwechselnd zu Kompression und Expansion der Luftmoleküle. Es entstehen Stellen mit Über- und Unterdruck, die sich auf benachbarte Bereiche übertragen und dadurch für die Transmission des Luftschalls sorgen. Die Schwankungen der Luftdichte überlagern sich mit dem atmosphärischen Luftdruck und werden vom Ohr als Schall wahrgenommen. [20]

Um ein Schallfeld quantitativ zu beschreiben, werden folgende akustische Größen verwendet [16]:

- Schallfeldgrößen: Schalldruck p , Schallschnelle v ;
- Schallenergiegrößen: Schallleistung P , Schallintensität I , Schallenergie-dichte w .

Der Schalldruck p ist dabei eine wesentliche Größe, um die Einwirkung von Geräuschen auf den Menschen zu beschreiben. Um die Stärke des Geräusches zu beschreiben, wird in der Akustik der Effektivwert des Schalldrucksignals \tilde{p} verwendet [20]:

$$\tilde{p} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p(t)^2 dt} \quad (2.1)$$

Der Effektivwert stellt den quadratischen Mittelwert über eine Periodendauer T dar.

Ein gesundes menschliches Ohr kann einen Dynamikumfang von ca. $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (Hörschwelle bei 1.000 Hz) bis ca. 20 Pa (Schmerzschwelle) verarbeiten. Um bei einem solch großen Dynamikbereich von sechs Größenordnungen mit handlichen

Größen zu arbeiten, werden die Größen in der Akustik in logarithmischer Form dargestellt und als Pegel bezeichnet. Das Formelzeichen für einen Pegel ist L (Level). Dieses wird mit einem Index versehen, der die darzustellende Größe beschreibt (z. B. L_p : Schalldruckpegel) und wird in Dezibel (dB) angegeben. Der Pegel ist ein logarithmiertes Größenverhältnis (Quotient) zweier Größen. [21] Für Feldgrößen, wie den Schalldruck p , gilt [21]:

$$L_p = 10 \cdot \lg \left(\frac{\tilde{p}^2}{p_0^2} \right) \text{ dB} \quad (2.2)$$

Dabei ist $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa der Bezugsschalldruck und stimmt mit der Hörschwelle überein.

In den folgenden Untersuchungen wird u. a. die Frequenzzusammensetzung (Schallspektrum) der emittierten Geräusche untersucht (vgl. Kapitel 4). In der Akustik ist hierfür das sog. Oktavspektrum gebräuchlich². Für die Frequenzanalyse werden Filter mit relativ konstanter Bandbreite verwendet, bei denen das Verhältnis Filterbreite Δf zu Filtermittenfrequenz f_m konstant ist. Für Oktavfilter gilt, dass die obere Grenze des Filters f_o (obere Grenzfrequenz) gleich der zweifachen unteren Frequenzgrenze f_u (untere Grenzfrequenz) ist [20]:

$$f_o = 2 \cdot f_u \quad (2.3)$$

Die geometrische Mitte der oberen und unteren Grenzfrequenz wird als Mittenfrequenz f_m bezeichnet und folgendermaßen berechnet [21]:

$$f_m = \sqrt{f_u \cdot f_o} = f_u \cdot \sqrt{2} = \frac{f_o}{\sqrt{2}} \quad (2.4)$$

Von der Filtermittenfrequenz $f_m = 1.000$ Hz berechnen sich alle weiteren Mittenfrequenzen nach folgender Gleichung [21]:

$$f_{m,i} = 1.000 \text{ Hz} \cdot 2^{i-10} \text{ mit } i = 1, \dots, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, \dots \quad (2.5)$$

Das Ziel von Schallmessungen ist es, ein Geräusch objektiv zu erfassen und mit einem charakteristischen Wert zu beschreiben, der der subjektiven Wahrnehmung des Menschen möglichst ähnlich ist. Da das menschliche Ohr stark frequenzabhängig reagiert, wird i. d. R. eine Frequenzbewertung des Schallsignals durchgeführt. Im Frequenzbereich von 1.000 Hz bis 5.000 Hz ist das Ohr am empfindlichsten. Die Empfindlichkeit nimmt zu hohen und tiefen Frequenzen jedoch stark ab. Um diese Tatsache zu berücksichtigen, wird die sog. A-Bewertung angewendet (siehe Abbildung 2.6). Im tiefen Frequenzbereich werden Einflüsse eines Signals durch starke Dämpfung der Pegelwerte nicht einbezogen. Eine Verstärkung des Signals erfolgt hingegen im Bereich zwischen 1.000 Hz und 5.000 Hz [19].

² Weitere in der Akustik gebräuchliche Spektren sind das Terzband- und Schmalbandspektrum (vgl. [20]).

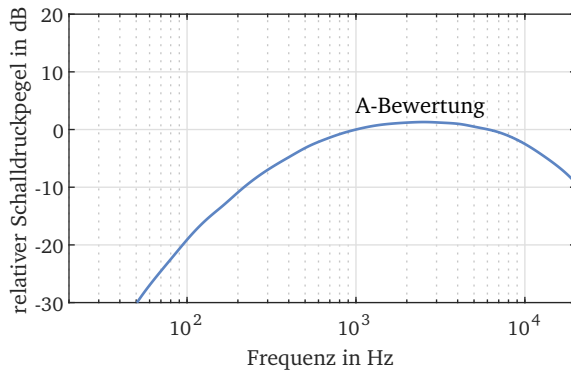


Abbildung 2.6.: Frequenzgang der A-Bewertung. [Eigene Darstellung nach [22]]

2.5 Schallabstrahlung des Triebwerks

Das von einem rollenden Flugzeug abgestrahlte Geräusch setzt sich im Wesentlichen aus dem Antriebsgeräusch, dem Rollgeräusch und dem Umströmungsgeräusch zusammen. Da das Flugzeug beim Rollen weitaus geringere Geschwindigkeiten als im Flugfall erreicht, treten rein aerodynamische Schallquellen, wie z. B. der Tragflügel, Rumpf, Klappen oder das Fahrwerk, in den Hintergrund. [16] Auch das Rollgeräusch spielt bei Rollgeschwindigkeiten bis etwa 50 km/h nur eine untergeordnete Rolle [23]. Damit dominiert das Antriebsgeräusch und das Triebwerk stellt die wichtigste Schallquelle dar.

Die Schallabstrahlung der Triebwerke wird zum einen durch den turbulenten Triebwerkfreistrahle und zum anderen durch die einzelnen Triebwerkskomponenten wie Turbine, Verdichter und Fan sowie durch die Verbrennungsprozesse innerhalb der Triebwerke verursacht. Je nach Triebwerk und abhängig von den Betriebsbedingungen treten die einzelnen Komponenten mehr oder weniger zum Vorschein. [16] Die Abstrahlcharakteristik eines Triebwerks ist in Abbildung 2.7 dargestellt. Bei modernen Triebwerken mit hohem Bypass-Verhältnis sinkt im Vergleich zu Triebwerken mit niedrigem Bypass-Verhältnis die Strahlaustrittsgeschwindigkeit und damit der emittierte Schall, sodass andere Schallquellen eher zum Vorschein kommen. Das Turbomaschinengeräusch, also das Geräusch von Fan, Verdichter und Turbine, tritt in den Vordergrund. Wenn die Strömungsgeschwindigkeit geringer ist als die Schallgeschwindigkeit, kann Schall entgegen der Strömungsrichtung wandern. Daher kann das Geräusch des Fans sowohl nach vorne als auch nach hinten abstrahlen. Auch das Geräusch des Verdichters (v. a. Niederdruckverdichter) wird

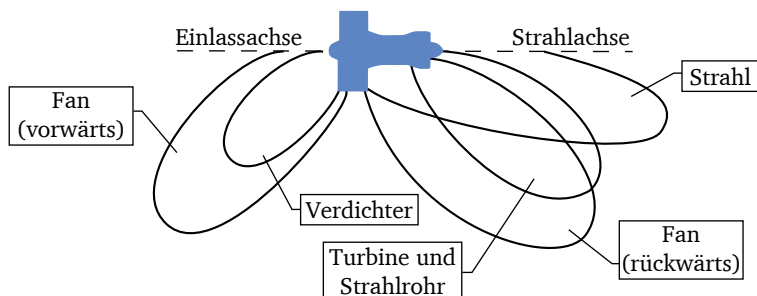


Abbildung 2.7.: Abstrahlcharakteristik eines Triebwerks mit großem Bypass-Verhältnis. [Eigene Darstellung nach [16]]

hauptsächlich nach vorne übertragen. Von der Turbine breitet sich das Geräusch im Wesentlichen nach hinten aus. Das Triebwerkstrahlgeräusch wird auf zwei Arten verursacht: Zum einen durch die Mischung des Triebwerkstrahls mit der umgebenden Atmosphäre (bei Turbofanantrieben auch die Mischung des kalten und heißen Triebwerkstrahls untereinander) und zum anderen durch die Ausbildung von Verdichtungsstößen, wenn der Strahl mit Überschallgeschwindigkeit die Düse verlässt. [16]

2.6 Lärm

Lärm ist in unserer Gesellschaft eine allgegenwärtige und unerwünschte Begleiterscheinung des technischen Fortschritts. Mit dem Fortschritt steigt der Lärm stetig an und führt verstärkt zu Lärminderungsmaßnahmen, um die Belastung für die Umwelt einzudämmen. Die stärkste Lärmbelastung geht heutzutage vom Verkehr aus [20]. Laut einer repräsentativen Umfrage des Bundesumweltamtes im Jahr 2016 fühlten sich rund 76 % der Menschen in Deutschland durch Straßenverkehrslärm, 38 % durch Schienenverkehrslärm und 44 % durch Fluglärm gestört oder belastigt [24, S. 51]. Zur Frage was Lärm ist und was Geräusche dazu werden lässt, gibt dieser Abschnitt einen Einblick. Des Weiteren wird im Folgenden Bodenlärm definiert und die für die Untersuchung relevanten Aspekte werden beschrieben.

2.6.1 Bodenlärm

Für die Untersuchung der Relevanz des Bodenlärms ist zunächst eine detaillierte Differenzierung zu Fluglärm und anderen Lärmquellen erforderlich. In den Fach-

gutachten G 6.3 und G 6.4 von Obermeyer Planen + Beraten [25, 26], die von der Fraport AG im Zuge einer schalltechnischen Untersuchung rund um den Ausbau des Flughafens Frankfurt in Auftrag gegeben wurden, wird folgende Abgrenzung vorgenommen:

Zum Fluglärm werden Emissionen gezählt, die von Flugzeugen ausgehen, die sich in der Luft oder auf Start- bzw. Landebahnen befinden. Dagegen umfasst der Bodenlärm die weiteren am Flughafen entstehenden Geräusche, vornehmlich durch Abfertigungsvorgänge von Flugzeugen vor dem Start oder nach der Landung. Dieser Lärm ist im Folgenden näher aufgeschlüsselt und spezifiziert:

- Triebwerkeinsätze stehender oder rollender Flugzeuge auf dem Vorfeld: Warmlaufen der Triebwerke (Run-up) vor dem Start bzw. Triebwerkläufe im unteren Lastbereich (Idle-Zustand) auf den Vorfeldpositionen
- Rollverkehr der Flugzeuge zwischen den einzelnen Start-/Landebahnen und dem Vorfeld mittels Schub der Triebwerke
- Einsatz von APU's auf den Vorfeldpositionen
- Einsatz der mobilen Bodenstromversorgung (ground power unit, GPU) auf einzelnen Abfertigungspositionen
- Triebwerkprüfstände
- Kfz-Fahrten im Vorfeldbereich: Flugzeugschlepper, Crew- und Passagierbusse, Betankungsfahrzeuge u. a.

Es wird deutlich, dass sich Bodenlärm aus einer Vielzahl von Quellen zusammensetzt. Diese Quellen befinden sich an unterschiedlichen Orten auf dem Flughafenareal und wechseln bedingt durch die Dynamik der Abfertigung regelmäßig die Position. Wegen der Bodennähe der verschiedenen Schallquellen spielt die Topografie und Bebauung eine wesentliche Rolle in der Schallausbreitung zu den Immissionspunkten. Dabei können Schallhindernisse oder Reflektoren zu einer Abschirmung bzw. Verstärkung führen. Hinsichtlich dieser Ausbreitungssituation ist mit lokal stark differenzierten Bodenlärmimmissionen zu rechnen. Ein weiteres Charakteristikum von Bodenlärm ist, dass er keine besondere Zeitstruktur aufweist. Dies bedeutet, dass Bodenlärm mehr oder weniger permanent vorhanden ist und in nicht vorhersagbarer Weise auftritt. [27] Abhängig vom Immissionsort auf dem Flughafengelände selbst können sich zum Bodenlärm vor allem Fluglärmanteile, aber auch Straßenverkehrslärm und andere Lärmquellen mischen. Im Gegensatz zum Fluglärm ist für Bodenlärm weiterhin charakteristisch, dass er unabhängig

von der Betriebsrichtung der Start- und Landebahnen und somit durchgängig wahrnehmbar ist.

Für die folgenden Untersuchungen werden lediglich Rollvorgänge und der Einsatz von APU's als Teil des Bodenlärms betrachtet. Alle anderen Quellen finden keine Berücksichtigung.

2.6.2 Mess- und Beurteilungsgrößen

Zur Bewertung des operationellen Schleppverfahrens werden u. a. Schallpegelmessungen durchgeführt (vgl. Kapitel 4). Dabei ist eine maßgebliche Kenngröße in der akustischen Messtechnik der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel $L_{p,A,eq,T}$. Dieser ist nach DIN 61672-1 [22] definiert als:

$$L_{p,A,eq,T} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{T} \int_0^T \frac{p_A^2(t)}{p_0^2} dt \right) \text{ dB(A)} \quad (2.6)$$

Dabei ist T die Messdauer in s, $p_A(t)$ der A-bewertete momentane Schalldruck bei Laufzeit t in Pa und p_0 der Bezugsschalldruck. Wird in Gleichung 2.6 anstatt der Messdauer T die Bezugszeit $T_0 = 1 \text{ s}$ eingesetzt, so ergibt sich daraus der Einzelereignispegel $L_{p,A,E}$ eines Schallereignisses. Dieser entspricht dem Pegel eines Rechteckimpulses von 1 s Dauer und enthält die gleiche Schallenergie wie das Schallereignis. [28]

Darüber hinaus wird der A-bewertete Maximalschalldruckpegel $L_{p,A,E,max}$ erfasst. Damit ist der Höchstwert während der Messdauer T und bei Anwendung der Zeitbewertung F (Fast)³ gemeint [28].

Angaben über die Schallstärke reichen jedoch i. d. R. für eine wirkungsbezogene Beurteilung allein nicht aus. Durch die Bildung eines Beurteilungspegels wird eine weitere Einflussgröße berücksichtigt. Der Beurteilungspegel L_r dient zur Kennzeichnung der Schallimmission während der Beurteilungszeit T_r . [28] Für eine ausführliche Beschreibung des in dieser Arbeit verwendeten Beurteilungspegels wird auf Unterabschnitt 5.1.2 verwiesen.

2.6.3 Wahrnehmung von Lärm

Der Begriff Lärm wird folgendermaßen definiert:

³ Der Schalldruckpegel $L_p(t)$ hängt auch von den dynamischen Eigenschaften des Schallpegelmessers ab. Die Zeitkonstante τ beträgt für die Zeitbewertung Fast 125 ms. [28]

„Lärm ist jede Art von Schall, durch den Menschen gestört, belästigt oder gar gesundheitlich geschädigt werden.“ [29]

In der Lärmwirkungsforschung spielt der in der Definition verwendete Begriff Belästigung eine herausragende Rolle. Die Belästigung spiegelt das Gefühl wider, durch Ereignisse gestört zu werden, ohne sie wirksam bewältigen zu können. [30] Der Begriff der Lärmbelästigung eignet sich im Gegensatz zur Lärmbelastung, um Lärm eine Individualität zu verleihen, die in seiner Definition implizit verankert ist. Koelega [31] trug 1987 mehrere Konzepte zusammen, die in der internationalen Erforschung von Lärmwirkungen zu finden sind. Er hielt fest, dass Lärmbelästigung als Lärmwahrnehmung, Emotion, Einstellung oder einer Mischung daraus verstanden werden kann. Die Belästigungsempfindung von Schall kann demnach als ein Maß für die Wahrnehmung von Lärm gesehen werden. Um diese Wahrnehmung von Lärm verstehen zu können, ist es notwendig, die einzelnen Faktoren zu betrachten, die eine Lärmbelästigungswirkung begünstigen.

Mit der Definition wird bereits deutlich, dass es sich bei Lärm um keine klar quantifizierbare Größe handelt. Ein Schallereignis anhand physikalisch messbarer Größen als Lärm zu identifizieren, ist aufgrund dieses subjektiven Einflusses nur bedingt möglich. Laborexperimentelle Studien haben gezeigt, dass akustische Merkmale wie Dauer, Häufigkeit, zeitlicher Verlauf und Frequenzzusammensetzung von Schall wichtige Kenngrößen zur Bewertung einer Belästigungsreaktion sind [32]. Diese sogenannten Belastungsparameter sind anhand von Messungen oder Berechnungen darstellbar. Häufig wird hierbei der A-bewertete äquivalente Dauerschallpegel $L_{p,A,eq}$ verwendet (vgl. Unterabschnitt 2.6.2). In einer Studie von Schreckenberget al. [33] zeigte sich beispielsweise, dass die Lärm-Belästigungs-Beziehung am stärksten ist, wenn der äquivalente Dauerschallpegel anstatt von anderen Parametern verwendet wird. Dennoch zeigen Untersuchungen, dass nicht nur der Dauerschallpegel, sondern auch die Anzahl der Schallereignisse über einem gewissen Schallpegel sowie der Maximalschallpegel L_{max} eine wichtige Rolle für die Bewertung von Schall spielen können. Hierbei zeigte sich mit steigender Häufigkeit oder mit wachsendem Maximalpegel jeweils eine zunehmende Anzahl belästigter Personen. Weitere Untersuchungen zeigen, dass i. d. R. ein monotoner Zusammenhang zwischen Schalldruckpegel und Belästigung nachgewiesen werden kann. Dies bedeutet, dass die Belästigungsreaktion mit dem Ansteigen des Schalldruckpegels zunimmt. [34]

Warum Menschen bei derselben Schallbelastung ein unterschiedliches Belästigungsurteil fällen, kann mit dem Konzept der Moderatorvariablen erklärt werden. Dieses Konzept berücksichtigt nicht-akustische Faktoren, die den Zusammenhang zwischen Geräuschbelastung und Wirkungsparametern beeinflussen. Guskı [35] fand heraus, dass sowohl persönliche als auch soziale Faktoren in das Lärmurteil

eines Betroffenen einfließen. Erstere umfassen vor allem die individuelle Lärmempfindlichkeit, die Angst vor von der Lärmquelle verursachten Schäden, die persönliche Bewertung der Situation und die Fähigkeit mit belastenden Situationen umzugehen. Die individuelle Lärmempfindlichkeit gilt als die einflussreichste Variable auf das Lärmurteil. Sie wird als generelle Persönlichkeitseigenschaft gesehen, die die persönliche Einschätzung der eigenen Empfindlichkeit gegenüber unerwünschten Geräuschen und die generelle Einstellung gegenüber Lärm widerspiegelt. [36] Die sozialen Faktoren umfassen die allgemeine Bewertung der Lärmquelle und das Vertrauen oder Misstrauen gegenüber den Verantwortlichen der Lärmbelastung. Dies zielt generell auf die Einstellung gegenüber der Lärmquelle ab. Diese sozialen Variablen spielen bei der Lärmbekämpfung eine wichtige Rolle, da sie individuell gering voneinander abweichen und normalerweise in gewissem Maße von mehreren Betroffenen geteilt werden. [35]

Die Lärmforschung geht davon aus, dass neben persönlichen und sozialen auch situative Faktoren die Wirkung der akustischen Belastung moderieren [37]. Prinzipiell kann jedes Geräusch Lärm sein, je nach Bewertung des Betroffenen. Ob ein Geräusch Lärm ist, wird nicht nur von verschiedenen Personen unterschiedlich empfunden, sondern auch durch denselben Betroffenen, abhängig von der Zeit des Auftretens und seiner momentanen Befindlichkeit, unterschiedlich erlebt. Es bestehen folglich nicht nur interindividuelle, sondern auch intraindividuelle Unterschiede. [38] Der Tageszeitpunkt der akustischen Belastung gehört hierbei laut Guski [37] zu den wichtigsten situativen Moderatorvariablen.

Ob ein Mensch Schall als Lärm wahrnimmt, hängt somit von verschiedenen Einflüssen ab. Da Lärm sowohl eine objektive als auch eine subjektive Komponente besitzt, lässt sich eine individuelle Belästigungsreaktion aus physikalischen Parametern alleine nicht prognostizieren. Die Lärmwirkungsforschung geht heute davon aus, dass etwa ein Drittel der Belästigung durch akustische und ein weiteres Drittel durch nicht-akustische Faktoren, den sogenannten Moderatoren, bestimmt wird. Das letzte Drittel kann nach heutigem Forschungsstand nicht bestimmt werden. [39]

In der Forschung gilt die Lärmbelästigung durch Umweltlärm als Hauptwirkung. Diese kann zu einer Minderung des körperlichen, psychischen und sozialen Wohlbefindens führen, wobei diese Reaktionen in vielschichtigen Wechselbeziehungen stehen (vgl. [30, 40, 41]).

3 Anwohnerbefragung zur Wahrnehmung von Bodenlärm

Im Laufe der Jahre wurden viele Untersuchungen zur Belästigung durch Lärm von Flughäfen durchgeführt. Davon legen jedoch nur sehr wenige Untersuchungen den Fokus auf Lärm, der durch Flugzeugbodenbewegungen verursacht wird. Auf dem „International Congress on Sound and Vibration“ im Jahre 2010 wurde eine Studie [12] vorgestellt, die die Bodenlärmbelästigung am Flughafen Bromma in der Nähe von Stockholm mittels einer Umfrage unter Anwohnern im Flughafennahbereich untersuchte. Bereits die an einem gering frequentierten Flughafen durchgeführte Studie zeigt, dass der durch Flugverkehrsaktivitäten am Boden entstehende Lärm zu einer Beeinträchtigung der Anwohner führt. Eine derartige Befragung zum Thema Bodenlärm rund um den hoch frequentierten Flughafen Frankfurt wurde bisher noch nicht durchgeführt und könnte demnach zu ähnlichen Ergebnissen führen.

Mithilfe der Befragung soll untersucht werden, ob Anwohner des Flughafens Frankfurt Bodenlärm wahrnehmen und wenn ja, wie sehr sie sich dadurch belästigt fühlen. Die Untersuchung wurde von der Verfasserin dieser Arbeit konzipiert, initiiert und betreut. Die Forschungsergebnisse wurden von Stauder in [42] erhoben.

3.1 Forschungsfragen und Hypothesen

Die theoretischen Einflusskomponenten auf die Befragung zur Wahrnehmbarkeit von Bodenlärm wurden in Unterabschnitt 2.6.3 dargelegt. Darauf basierend werden die Forschungsfrage und deren Hypothesen abgeleitet. Als Untersuchungsgruppe dienen die Anwohner des Flughafennahbereiches (vgl. Abschnitt 2.3).

Das Dosis-Wirkungs-Prinzip lässt sich wie folgt definieren: Je höher und länger die Intensität und Dauer der Lärmbelastung, desto tiefgreifender kommt es zu einer Wirkung durch Lärm [43, S. 3]. Die Lärmwahrnehmung repräsentiert durch das Belästigungsurteil bereits die erste Stufe einer Lärmwirkung. Die Höhe der Belästigung kann als Maß für die Wahrnehmung des Lärms verwendet werden. [38, S. 144f.] Daraus leitet sich die Forschungsfrage (FF) ab:

FF: Wie stark belästigend wird der Bodenlärm von den Anwohnern wahrgenommen?

Auf Grundlage des Dosis-Wirkungs-Prinzips müssten Unterschiede im Belästigungsurteil der Untersuchungsgruppe festzustellen sein. Anwohner sind abhängig von ihrer Wohnlage einer unterschiedlichen Dosis an Bodenlärm ausgesetzt. Diese wird bestimmt durch die Entfernung zum Flughafen und den dazwischen liegenden baulichen Elementen wie Schallschutzmauern und Gebäudeanordnungen. Bei Anwohnern kann eher von einer längerfristigen Lärmexposition ausgegangen werden, weshalb ein generelles Belästigungsempfinden untersucht werden kann.

Es soll untersucht werden, inwieweit die Variation der Bodenlärmbelastung zu unterschiedlichen Belästigungsurteilen führt. Hieraus leitet sich für die Untersuchungsgruppe die folgende Hypothese (H1) ab:

H1: Anwohner, die durch ihre Wohnlage einer höheren Bodenlärmbelastung ausgesetzt sind, berichten ein höheres Belästigungsempfinden durch Bodenlärm als Anwohner, die durch ihre Wohnlage einer niedrigeren Bodenlärmbelastung ausgesetzt sind.

Wie in Unterabschnitt 2.6.3 erläutert, hängt es von akustischen sowie nicht-akustischen Faktoren ab, ob ein Mensch ein Geräusch als Lärm bezeichnet. Die nicht-akustischen Faktoren lassen sich in persönliche, soziale und situative Einflüsse kategorisieren. [35] Situative Einflüsse spielen in dieser Untersuchung eine untergeordnete Rolle, da die generelle Belästigungswirkung des Bodenlärms herausgearbeitet werden soll. Zu den persönlichen Einflüssen trägt die individuelle Lärmempfindlichkeit am deutlichsten bei. Die sozialen Einflüsse werden stark geprägt von der Einstellung des Betroffenen gegenüber der Lärmquelle oder den Verantwortlichen des Lärms. Die genannten nicht-akustischen Parameter moderieren laut der Lärmforschung den Einfluss der akustischen Parameter auf das Belästigungsurteil. [39] Daher ist zu vermuten, dass lärmempfindlichere Probanden bei gegebener Dosis Bodenlärm belästigender wahrnehmen als lärmunempfindlichere Probanden. Ebenso ist zu vermuten, dass Probanden mit einer negativen Einstellung gegenüber dem Flughafen Bodenlärm bei gegebener Dosis belästigender wahrnehmen als Probanden mit einer positiveren Einstellung gegenüber dem Flughafen. Hieraus leiten sich die Subhypothesen H1.1 und H1.2 ab:

H1.1: Bei gegebener Bodenlärmbelastung ist die empfundene Belästigung der Anwohner höher, wenn eine höhere Lärmempfindlichkeit vorliegt.

H1.2: Bei gegebener Bodenlärmbelastung ist die empfundene Belästigung der Anwohner höher, wenn eine negative Einstellung gegenüber dem Flughafen vorliegt.

Abbildung 3.1 gibt die Beziehungen zwischen den einzelnen zu erhebenden Variablen wieder.

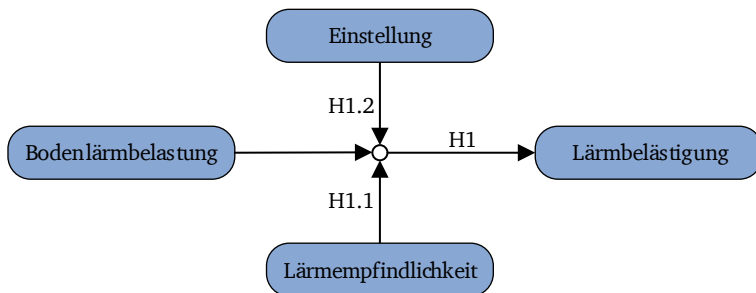


Abbildung 3.1.: Zu untersuchende Zusammenhänge zwischen den zu erhebenden Variablen der Anwohner. [Eigene Darstellung]

3.2 Befragungsmethodik

In diesem Abschnitt werden die methodischen Inhalte und Vorgehensweise der Anwohnerbefragung dargestellt. Zunächst wird hierzu auf die Konzeptionierung des Fragebogens und den Vortest eingegangen. Dem schließt sich die Planung der Studie sowie deren Durchführung an. Abgeschlossen wird die Methodik durch die Aufbereitung der Daten für die Auswertung.

3.2.1 Konzeptionierung der Befragung

In diesem Unterabschnitt wird die Konzeptionierung der Befragung dargestellt. Hierunter fällt zunächst die Auswahl eines geeigneten Erhebungsinstruments. Es folgen die Darstellung der für den Fragebogen relevanten Konstrukte und der Fragebogenaufbau.

3.2.1.1 Erhebungsinstrument

Als Erhebungsinstrument wurde die schriftliche Befragung ohne Anwesenheit des Interviewers ausgewählt. Vorteile einer schriftlichen Befragung sind meist ein geringerer Zeit- und Personalaufwand als dies bei mündlichen Befragungen (Interviews) der Fall wäre. Somit kann eine größere Zahl von Befragten in kürzerer Zeit erzielt werden. [44, S. 157] Darüber hinaus bestehen verschiedene methodische und inhaltliche Vorteile. Es können z. B. Interviewerfehler vermieden werden. Zudem antworten die Befragten ehrlicher und überlegter, da mehr Zeit beim Ausfüllen vorhanden ist. [45, S. 351] Die mündliche Befragung gäbe zwar dem Interviewer

die Möglichkeit, Regel- und Kontrollfunktionen zu übernehmen [44, S. 136], andererseits nähme der Interviewer aber direkten Einfluss auf den Verlauf des Gesprächs und würde somit einen Verzerrungsfaktor darstellen [46, S. 68]. Nachteilig bei einer schriftlichen Befragung wirkt sich eventuell aus, dass die Befragungssituation ohne Anwesenheit eines Interviewers nicht kontrollierbar ist. Es besteht dann die Möglichkeit, dass andere Personen die Beantwortung beeinflussen, einzelne Fragen unvollständig ausgefüllt oder übersehen werden, oder der Fragebogen von anderen als der Zielperson ausgefüllt wird. [44, S. 157] Um bei der schriftlichen Befragung den Nachteil einer geringen Kontrollierbarkeit der Befragungssituation abzuschwächen, ist der Interviewer zwar nicht anwesend, legt allerdings dem Befragten die Ziele und Durchführung im Vorfeld der Studie hinreichend dar. Nach etwa 30 Minuten sammelt der Interviewer den Fragebogen wieder ein und steht hierbei für Rückfragen zur Verfügung.

3.2.1.2 Fragebogenkonstrukte

Um die Forschungsfrage beantworten zu können, werden Fragebogenkonstrukte benötigt, die es ermöglichen, die Lärmbelästigung, Einstellung gegenüber dem Flughafen sowie Lärmempfindlichkeit zu erfassen.

Erfassung der Lärmbelästigung

Zur Messung der durch Bodenschall hervorgerufenen Belästigung bietet sich die Methode der direkten Befragung an. Jedoch gibt es hierfür derzeit keinen öffentlich zugänglichen und mit hohen Gütekriterien ausgestatteten Fragebogen. Hingegen existiert bereits ein standardisiertes Instrument, das Belästigung durch Schall im Allgemeinen misst. Dieses Instrument verwendet lediglich ein Item¹. Vorteil des standardisierten Instruments ist die internationale Vergleichbarkeit der Ergebnisse, da es dafür eigens vom ICBEN Team 6 (The International Commission on the Biological Effects of Noise) [47] formuliert wurde. Die Erfassung eines Konstrukts mit nur einem Item ist aber mit Schwierigkeiten verbunden. Eine Verringerung der Reliabilität (Zuverlässigkeit) und Validität (Gültigkeit) ist dadurch möglich [48].

Da in die Lärmbelästigung viele Aspekte hineinwirken, werden sechs zusätzliche Items entwickelt. Um die Items zu formulieren, werden Aspekte und Assoziationen der Lärmbelästigung aus der Literatur gesammelt und ausgewertet. Hierzu gehören die Störung geplanter Tätigkeiten, emotionaler Stress und das Ausmaß an Akzeptanz umweltbedingter Ärgernisse [31]. Hinzu kommen die Einschätzung der Vermeidbarkeit des Schalls, die Bewertung der Anpassungs- bzw. Bewältigungsprozesse sowie Vergleiche mit früheren Belastungssituationen [49]. Jeder dieser

¹ Mit dem Begriff Item ist die Fragestellung innerhalb eines Fragebogens gemeint.

Aspekte wird jeweils innerhalb eines Items formuliert. Als Antwortskala wird das fünfstufige, äquidistante Format des standardisierten ICBEN-Items verwendet (äußerst (5), stark (4), mittelmäßig (3), etwas (2), überhaupt nicht (1)).

Erfassung der Einstellung gegenüber dem Flughafen Frankfurt

Neben der Lärmempfindlichkeit gilt das Konstrukt der Einstellung gegenüber dem Lärmverursacher als wichtige Moderatorvariable zwischen Lärmbelastung und Lärmbelästigung. Für die Erfassung der Einstellung zum Flughafen Frankfurt existiert bereits ein Fragebogen, der von Sommerfeld [50] entwickelt wurde. Dieser besteht aus neun Items, von denen vier eine positive und fünf eine negative Einstellung abfragen. Die verwendete Antwortskala beinhaltet fünf Stufen: stimme sehr zu (5), stimme ziemlich zu (4), stimme mittelmäßig zu (3), stimme wenig zu (2) und stimme gar nicht zu (1). Der aus den Ergebnissen aller Items gebildete Mittelwert ergibt für hohe Werte eine positive und für niedrige Werte eine negative Einstellung gegenüber dem Flughafen. Im Rahmen dieser Untersuchung wird das Konstrukt übernommen, um die Einstellung gegenüber dem Flughafen Frankfurt zu messen.

Erfassung der Lärmempfindlichkeit

Zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit fällt die Wahl auf die Kurzversion des Lärmempfindlichkeitsfragebogens (LEF-K) von Zimmer und Ellermeier [51]. Dieser erfasst Aussagen zu Geräuschen in mehreren Bereichen (z. B. Alltag, Freizeit, Gesundheit), ist in seiner ursprünglichen Version mit 52 Items jedoch zu lang für eine Befragung in diesem Rahmen. Daher wird die Kurzversion mit neun Items gewählt. Durch die Reduzierung der Items sinkt zwar die Reliabilität etwas ($\alpha = .66 - .69$), dennoch weist der Fragebogen akzeptable Gütekriterien auf. Die Kurzversion LEF-K misst auf einer vierstufigen Antwortskala mit größer werdendem Wert eine größere Lärmempfindlichkeit (stimmt genau (4), stimmt eher (3), stimmt eher nicht (2), stimmt gar nicht (1)). Die Erfassung der Lärmempfindlichkeit im Rahmen dieser Befragung dient dazu, das Belästigungsurteil gegenüber Bodenlärm zu erklären und zu stützen.

3.2.1.3 Fragebogaufbau

Der Fragebogen ist aus drei Teilen aufgebaut: der Einleitung, dem Hauptteil und dem Abschluss. Der entwickelte Fragebogen ist Anhang A.1 zu entnehmen.

Die Einleitung dient dazu, die angesprochenen Personen zu einer Teilnahme an der Befragung zu motivieren. Um das zu erreichen, werden die Hintergründe der Erhebung erläutert und auf die Möglichkeit hingewiesen, bei vollständiger Beant-

wortung des Fragebogens an einer Verlosung zweier Amazon-Gutscheine teilzunehmen.

Der Hauptteil des Fragebogens besteht aus vier Blöcken: Zunächst wird der Begriff Bodenlärm definiert und möglichst eindeutig vom Begriff Fluglärm abgegrenzt. Damit soll erreicht werden, dass der Proband ausreichend in die Thematik der Erhebung eingeführt wird und die Fragestellungen richtig einordnen kann. Innerhalb des ersten Blocks wird die Lärmbelästigung durch Bodenlärm erfasst. Dabei wird ein Bezug zu den vergangenen zwölf Monaten hergestellt. Der zweite Block im Fragebogen erfasst drei Kontrollvariablen. Diese umfassen die Fragen zum aktuellen Wohnort und Wohndauer sowie die Frage zur Aufenthaltsdauer, die der Teilnehmer täglich zu Hause verbringt. Der zweite Block endet mit der Frage, ob der Teilnehmer am Flughafen arbeitet. Der dritte Themenblock erfasst das Konstrukt der Einstellung des Probanden gegenüber dem Flughafen Frankfurt. Die Einstellung wird mit neun Items erfasst, aus denen sich die Einstellungsskala errechnet. Auch der vierte Themenblock umfasst neun Items und erfasst das Konstrukt der Lärmempfindlichkeit. Hierzu soll sich der Befragte in verschiedene Alltagssituationen versetzen und diese nach eigenem Empfinden bewerten.

Den Abschluss des Fragebogens bildet die Erhebung der demographischen Daten. Hierzu werden das Geschlecht, Alter, der höchste Bildungsabschluss und die derzeitig überwiegende Tätigkeit erfragt. Abschließend bekommen die Probanden bei vollständigem Ausfüllen des Fragebogens die Möglichkeit, an der Verlosung von Amazon-Gutscheinen teilzunehmen. Insgesamt werden 33 Items abgefragt.

3.2.2 Vortest

Für den Vortest wurde der Anwohner-Fragebogen an 15 Personen ausgehändigt, um diesen auf Vollständigkeit und Verständlichkeit überprüfen zu lassen. Hierzu wurden Personen ausgewählt, die bereits Erfahrungen mit Studien besitzen, aber bisher wenig bis keine Erfahrung in der Konzeptionierung und Ausführung von Studien haben. Generell wurde auf ein einheitliches Sprachniveau geachtet. Dies bedeutet, dass lediglich erwachsene Personen für den Vortest in Frage kamen, die Deutsch als Muttersprache beherrschen. Die Verbesserungen wurden anschließend in die Fragebögen eingearbeitet.

3.2.3 Planung der Befragung

Dieser Abschnitt umfasst die für die Planung dieser Befragung notwendigen Inhalte. Zunächst wird die Vorgehensweise für die Auswahl der Stichprobe erläutert.

Anschließend wird die Rekrutierung der Teilnehmer beschrieben und auf die Interviewer sowie deren Schulung eingegangen.

3.2.3.1 Auswahl der Stichprobe

Da Fluglärm eine der stärksten Störvariablen für die Wahrnehmung von Bodenlärm ist, sollen Flughafenanwohner befragt werden, die sich nicht in den direkt überflogenen An- und Abflugbereichen befinden. Hiermit soll der Einfluss der Störvariable Fluglärm auf die Bodenlärmwahrnehmung minimiert werden. Auf Grundlage des in Abschnitt 2.3 definierten Flughafennahbereiches wird eine geographische Vorauswahl der Stichprobe durchgeführt. Um die aufgestellten Hypothesen zu überprüfen, müssen Anwohner ausgewählt werden, die sowohl einer höheren als auch einer niedrigeren Bodenlärmbelastung ausgesetzt sind. Hierzu konnte auf Schalldruckpegelmesswerte des Deutschen Fluglärmdienstes (DFLD) und der Fraport AG zurückgegriffen werden. Basierend auf den Messwerten werden zwei Hauptuntersuchungsgruppen und eine Kontrollgruppe definiert (siehe Abbildung 3.2). Die zwei Hauptuntersuchungsgruppen befinden sich nördlich des Flughafens in der Stadt Kelsterbach. Die Kontrollgruppe ist hingegen südlich des Flughafens in Mörfelden-Walldorf gelegen. In beiden Städten ist davon auszugehen, dass Bodenlärm durch die verschiedenen Bebauungssituationen unterschiedliche Charakteristika aufweist. Diese beinhaltet die Entfernung zum Flughafen, aber auch die Topografie des Geländes und die Anordnung des Flughafens. Im Norden befindet sich die Nordwestbahn in unmittelbarer Nähe zu Wohngebieten. Die Landebahn ist über zwei nicht schallgeschützte Brücken über die Autobahn A3 mit dem Kern-Flughafen verbunden. Im Süden befinden sich hauptsächlich die Zubringer der Startbahn 18 (Startbahn West) sowie Anlagen für Triebwerkprobeläufe, die Bodenlärm erzeugen.

Die Lage der gewählten Hauptuntersuchungsgebiete und die verwendeten Messstationen in Kelsterbach sind Abbildung 3.3 zu entnehmen. Im Norden des Flughafens können die Messwerte zweier Messstationen des DFLD (Stationen Kelsterbach 3 und 4) bestätigen, dass die Entfernung zur Lärmquelle und die Abschirmung durch Bebauung zu Belastungsunterschieden führen. Die zum Flughafen ausgerichteten Randgebiete (repräsentiert durch die Messstation Kelsterbach 4) erweisen sich im Vergleich zum Stadtkern (repräsentiert durch die Messstation Kelsterbach 3) als höher belastet. Zudem zeigen die Messwerte, dass der Fluglärm in den ausgewählten Gebieten Stadtrand und Stadtkern nur einen vergleichsweise geringen Anteil ausmacht. Dafür wurden die äquivalenten Dauerschallpegel von sieben durchgehend erfassten Monaten (Dezember 2014 – Juni 2015) miteinander verglichen. Der Vergleich ist im Anhang A.2 dargestellt.

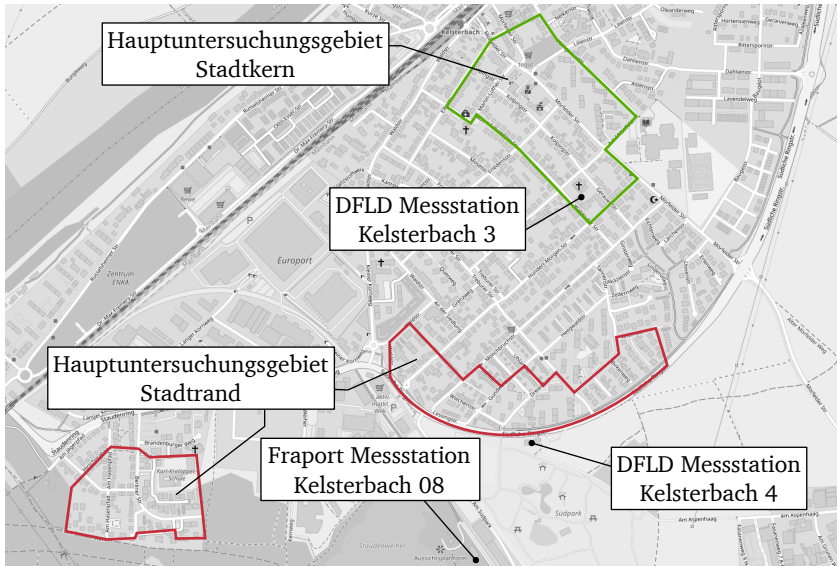


Abbildung 3.3.: Hauptuntersuchungsgebiete und Standorte der verwendeten Messstationen in Kelsterbach. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

sitzen, dass die Akquise erfolgreich ist. Zudem sollte die Anzahl der registrierten Überflüge zwischen dem Hauptuntersuchungsgebiet und der Kontrollgruppe vergleichbar sein. Anhand dieser Kriterien wurde das Stadtgebiet von Mörfelden als Kontrollgruppe ausgewählt, da es den Anforderungen am besten entspricht (siehe Abbildung 3.4). Die hier lokalisierte Messstation Mörfelden 1 weist eine ähnliche Anzahl an detektierten Überflugereignissen und nur eine etwas geringere Dauerschallbelastung als der Stadtkern von Kelsterbach auf (vgl. Anhang A.2). Durch die Informationen der Stationsleitung und der Entfernung zum Flughafen sowie der topografischen Gegebenheiten wird hier von einer sehr geringen oder sogar nicht vorhandenen Belastung durch Bodenlärm ausgegangen.

Die getroffenen Annahmen werden durch die von der Fraport AG herausgegebenen Messwerte [52] bestärkt. Die Differenz zwischen dem Dauerschallpegel der Messstation Kelsterbach 08 (Messort siehe Abbildung 3.3) und der Messstation Mörfelden Süd 77 (Messort siehe Abbildung 3.4) beträgt lediglich 1 dB(A).

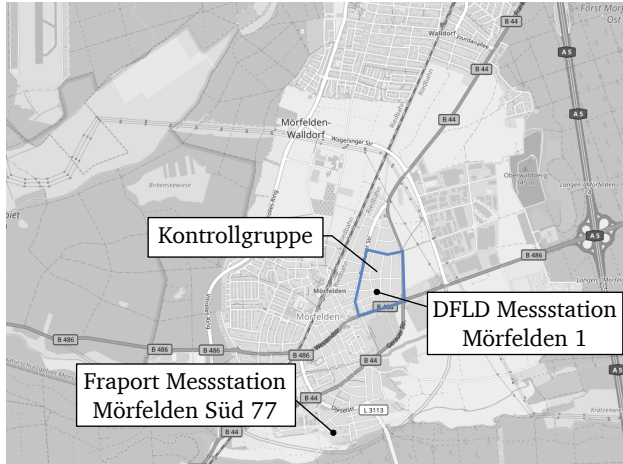


Abbildung 3.4.: Kontrollgruppengebiet und der verwendeten Messstationen in Mörfelden-Walldorf. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

3.2.3.2 Rekrutierung

Die Stadtverwaltungen in Kelsterbach und Mörfelden-Walldorf wurden im Vorfeld der Befragung schriftlich informiert. Die anschließende Rekrutierung möglicher Teilnehmer erfolgte durch direkte Ansprache. Dabei wurden die Versuchsteilnehmer nach dem Zufallsprinzip ausgewählt. Hierzu wurden die Stadtregister der drei für die Untersuchung ausgewählten Stadtgebiete zusammengetragen. Daraus wurden Straßen zufällig ausgewählt und jede dritte Hausnummer für eine potentielle Rekrutierung bestimmt. Pro ausgewählter Straße sollten maximal fünf Probanden für die Befragung akquiriert werden. Dadurch sollte eine ausreichende Durchmischung der Stichprobe im Stadtgebiet erreicht werden. Probanden wurden nur dann befragt, wenn sie ausreichend Zeit für die Befragung hatten. Dadurch konnte i. d. R. ein vorzeitiger Abbruch der Befragung vermieden werden. Pro Haushalt wurde lediglich ein Proband befragt, um hierdurch entstehende Verzerrungen zu vermeiden. Haushalte, die unmittelbar an viel befahrenen Hauptverkehrsstraßen liegen, wurden bei der Rekrutierung ausgeschlossen. Gleiches gilt für Haushalte in direkter Nachbarschaft zu größeren Baustellen. Zum Ausfüllen des Fragebogens wurde den Probanden 30 Minuten Zeit eingeräumt. Abschließend wurde der Bo-

gen auf Vollständigkeit und Verständlichkeit überprüft und Unklarheiten bei den Teilnehmern behoben.

3.2.3.3 Interviewer und Interviewerschulung

Die Durchführung der Befragungen erfolgte mit Blick auf den Umfang der Stichprobe nicht nur durch den Versuchsleiter. Zur Unterstützung wurden drei weitere Interviewer mit der Durchführung der Befragungen beauftragt. Ein weiterer Vorteil hiervon ist die Eindämmung von Interviewereffekten. Faktoren wie das Alter, Geschlecht, Persönlichkeit, Einstellung und Erwartung des Interviewers können die Antworten der Befragten unbewusst verfälschen. Durch mehrere Interviewer verringern sich diese systematischen Verzerrungen. [53, S. 246] Zum Zeitpunkt der Erhebung lag das Alter der Interviewer zwischen 23 und 31 Jahren. Zwei der Interviewer waren weiblich und zwei männlich.

Damit die Befragungen möglichst standardisiert ablaufen und um potenziellen Verzerrungseffekten entgegenzuwirken, absolvierten die Interviewer vorab eine Interviewerschulung. Zentrales Ziel der Schulung war es, alle Interviewer auf den gleichen Stand zu bringen, damit die Befragungen unter möglichst gleichen Bedingungen durchgeführt und die Vergleichbarkeit der Ergebnisse gesteigert wird.

3.2.4 Durchführung und Beobachtungen

Die Erhebung der Studie fand im Zeitraum zwischen dem 05. August und 21. August 2015 statt. Dabei konnten Daten von insgesamt 85 Teilnehmern erhoben werden: 31 Personen aus dem Stadtkern, 29 aus dem Stadtrand und 25 aus dem Kontrollgruppengebiet.

Die Rekrutierung gestaltete sich aus unterschiedlichen Gründen als schwierig. Viele Anwohner gaben an, bereits mehrfach zu lärmspezifischen Themen befragt worden zu sein. Ebenso konnte ein häufiges Misstrauen gegenüber Befragungen zum Thema Lärm registriert werden. Personen verneinten ebenso die Teilnahme, wenn sie keinen positiven Nutzen für sich persönlich vermuteten oder kein Problem mit dem Flughafen haben. Ein häufiger Grund nicht an der Befragung teilzunehmen war, weil es sich um den eigenen Arbeitgeber handelte. Probanden, die sich dazu entschieden an der Studie teilzunehmen, füllten die Fragebögen i. d. R. vollständig aus. Insgesamt belief sich die Rücklaufquote auf 93,4 %. Viele der teilnehmenden Probanden zeigten ein erhöhtes Bedürfnis, sich über die Lärmthematik mitteilen zu dürfen, unabhängig ihrer Einstellung.

3.2.5 Datenaufbereitung

In dieser Untersuchung wird sowohl das Konstrukt der Einstellung gegenüber dem Flughafen als auch das Konstrukt der Lärmempfindlichkeit erhoben. Die jeweils aus neun Items bestehenden Konstrukte werden über den Mittelwert zu einzelnen Skalen zusammengefasst. Diese beiden Skalen werden für die weiteren Berechnungen verwendet. Bevor die Skalen korrekt gebildet werden können, müssen fünf Werte der Einstellungsskale (3.b, 3.d, 3.e, 3.g, 3.i) und vier Werte der Lärmempfindlichkeitsskale (4.b, 4.e, 4.f, 4.h) invertiert werden, da sie entweder flughafenkritische Fragen oder lärmunempfindliche Situationen darstellen. Anschließend werden die Items gemittelt, um sowohl die Einstellungsskala als auch die Lärmempfindlichkeitsskala zu bilden. Somit gelten für die Interpretation der beiden Skalen folgende Regeln: Je höher der Mittelwert der Einstellungsskala ausfällt, desto positiver die Einstellung gegenüber dem Flughafen. Je höher der Mittelwert der Lärmempfindlichkeitsskala, desto lärmempfindlicher ist die Person.

3.3 Befragungsergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Befragungsergebnisse dargestellt. Zunächst wird die Stichprobe beschrieben. Darauf folgt die Auswertung der Fragebögen und abschließend die Untersuchung des Einflusses der erhobenen Störvariablen auf die Untersuchungsgruppen.

3.3.1 Beschreibung der Stichproben

Die Beschreibung der Stichprobe erfolgt anhand standardisierter Daten: Geschlecht, Alter, höchster Bildungsabschluss und momentan überwiegende Beschäftigung. Neben den abhängigen Variablen werden innerhalb der Befragung auch Kontrollvariablen erhoben. Diese umfassen die Wohndauer, die tägliche Aufenthaltsdauer zu Hause sowie ob die Befragten am Flughafen arbeiten. Bis auf das Geschlecht können diese Variablen einen Einfluss auf das Belästigungsurteil haben, wenn auch vermutlich nur einen schwachen. Im Folgenden wird die Verteilung der genannten Variablen in der Stichprobe beschrieben.

3.3.1.1 Geschlecht

Tabelle 3.1 zeigt die Häufigkeiten des Geschlechts in den beiden Hauptuntersuchungsgruppen, der Kontrollgruppe sowie der Gesamtstichprobe. Insgesamt sind

45,9 % der Probanden männlich und 54,1 % weiblich. Somit ist die Geschlechtsverteilung fast ausgewogen. Auch innerhalb der Untersuchungsgruppen zeichnet sich eine ähnliche Verteilung ab.

Tabelle 3.1.: Absolute und relative Häufigkeit der Geschlechtsverteilung für jede Stichprobe und für die Gesamtstichprobe.

| Stichprobe | Männlich | | Weiblich | |
|----------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| | Absolute Häufigkeit | Relative Häufigkeit in % | Absolute Häufigkeit | Relative Häufigkeit in % |
| Stadtrand | 13 | 44,8 | 16 | 55,2 |
| Stadtkern | 16 | 51,6 | 15 | 48,4 |
| Kontrollgruppe | 10 | 40,0 | 15 | 60,0 |
| Gesamt | 39 | 45,9 | 46 | 54,1 |

3.3.1.2 Alter

Tabelle 3.2 zeigt die Altersverteilung der drei Substichproben und der Gesamtstichprobe. Das Durchschnittsalter der Gesamtstichprobe liegt bei 52,3 Jahren. Die einzelnen Substichproben weichen kaum vom Mittelwert der Gesamtstichprobe ab. Allerdings weist die Kontrollgruppe mit einer Standardabweichung von 21,4 eine größere Streuung als die anderen beiden Subgruppen auf. Der jüngste Befragte war 14 Jahre alt und der Älteste gab ein Alter von 91 Jahren an.

Tabelle 3.2.: Mittelwert und Standardabweichung des Alters für jede Substichprobe und die Gesamtstichprobe.

| Stichprobe | Mittelwert | Standardabweichung |
|----------------|-------------|--------------------|
| Stadtrand | 54,9 | 18,8 |
| Stadtkern | 53,6 | 15,2 |
| Kontrollgruppe | 47,8 | 21,4 |
| Gesamt | 52,3 | 18,4 |

3.3.1.3 Wohndauer

In Tabelle 3.3 wird die durchschnittliche Wohndauer am aktuellen Wohnort angegeben. Innerhalb der Gesamtstichprobe liegt die durchschnittliche Dauer des Wohnaufenthaltes bei 26,3 Jahren. Zwischen den drei Substichproben ist kaum ein Unterschied im Mittelwert erkennbar. Der Stadtrand weist mit einer Standardabweichung von 21,7 die größte Streuung auf.

Tabelle 3.3.: Mittelwert und Standardabweichung der Wohndauer am aktuellen Wohnort für jede Substichprobe und die Gesamtstichprobe.

| Stichprobe | Mittelwert | Standardabweichung |
|----------------|-------------|--------------------|
| Stadtrand | 26,2 | 21,7 |
| Stadtkern | 26,4 | 15,5 |
| Kontrollgruppe | 26,3 | 19,9 |
| Gesamt | 26,3 | 18,9 |

3.3.1.4 Tägliche Aufenthaltsdauer zu Hause

Tabelle 3.4 zeigt die Aufenthaltsdauer, die von den Befragten durchschnittlich täglich zu Hause verbracht wird. In der Gesamtstichprobe liegt diese bei knapp 16 Stunden. Die drei Substichproben unterscheiden sich hier nur leicht voneinander. Der Stadtrand gab an, etwa 1,6 Stunden am Tag mehr zu Hause zu verbringen als die Kontrollgruppe.

Tabelle 3.4.: Mittelwert und Standardabweichung der täglichen Aufenthaltsdauer zu Hause für jede Substichprobe und die Gesamtstichprobe.

| Stichprobe | Mittelwert | Standardabweichung |
|----------------|-------------|--------------------|
| Stadtrand | 16,6 | 5,0 |
| Stadtkern | 15,5 | 4,2 |
| Kontrollgruppe | 15,0 | 4,4 |
| Gesamt | 15,7 | 4,5 |

3.3.1.5 Beschäftigung am Flughafen

Tabelle 3.5 gibt die Häufigkeiten der Beschäftigung am Flughafen Frankfurt unter den Befragten an. Diese liegt in der Gesamtstichprobe bei knapp 12 %. Die Substichproben unterscheiden sich hierbei. Während der Stadtkern und die Kontrollgruppe eine annähernd gleiche Häufigkeit zeigen, weist der Stadtrand mit 17,2 % einen deutlich höheren Wert auf. Dies muss bei der Auswertung und Diskussion der Ergebnisse beachtet werden, da es dadurch zu möglichen Verzerrungen kommen kann.

Tabelle 3.5.: Absolute und relative Häufigkeiten der Beschäftigung am Flughafen für jede Substichprobe und für die Gesamtstichprobe.

| Stichprobe | Ja | | Nein | |
|----------------|---------------------|--------------------------|---------------------|--------------------------|
| | Absolute Häufigkeit | Relative Häufigkeit in % | Absolute Häufigkeit | Relative Häufigkeit in % |
| Stadtrand | 5 | 17,2 | 24 | 82,8 |
| Stadtkern | 3 | 9,7 | 28 | 90,3 |
| Kontrollgruppe | 2 | 8,0 | 23 | 92,0 |
| Gesamt | 10 | 11,8 | 75 | 88,2 |

3.3.1.6 Höchster Bildungsabschluss

Abbildung 3.5 zeigt die Verteilung der höchsten Bildungsabschlüsse in der Gesamtstichprobe. Es ist zu erkennen, dass der größte Anteil der Probanden Realschulabschluss/Mittlere Reife (30) als höchsten Bildungsabschluss angab, gefolgt vom Hochschulabschluss (19) und vom Volks-/Hauptschulabschluss (13). Die Kategorien „Abitur“ (9), „Fachabitur/Fachhochschulreife“ (7), „Noch Schüler“ (2) und „Kein Schulabschluss“ (1) kamen ebenfalls in der Gesamtstichprobe vor. Drei Probanden machten keine Angabe.

3.3.1.7 Beschäftigung

Abbildung 3.6 zeigt die Verteilung der momentanen Beschäftigung der Gesamtstichprobe. Die abgefragten Kategorien Bundesfreiwilligendienst und Beamte/r

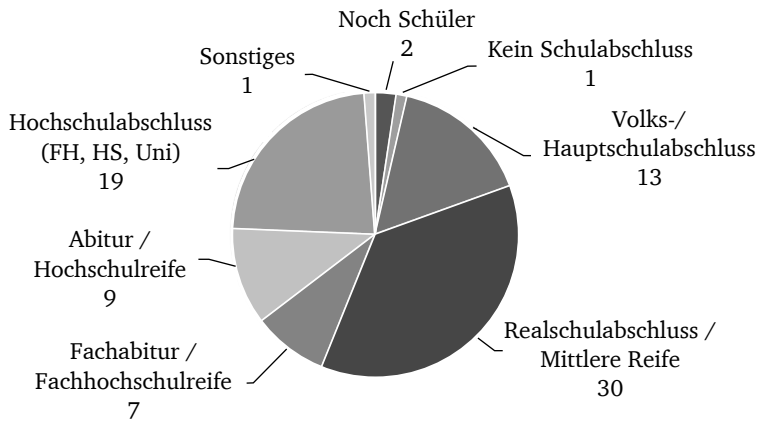


Abbildung 3.5.: Verteilung der höchsten Bildungsabschlüsse in der Gesamtstichprobe (absolute Häufigkeit).

werden in der Grafik nicht aufgeführt, da diese auf keinen Probanden zutreffen. Insgesamt machten alle Probanden eine Angabe zu ihrer momentanen Beschäftigung. Den größten Anteil umfasst die Kategorie „Rentner/in“ (29) gefolgt von „Angestellte/r“ (27). Auf die Kategorien „Hausfrau/Hausmann“ (8), „Selbstständige/r“ (7), „Schüler/in“ (4), „Student/in“ (4) und „Arbeitssuchende/r“ (1) entfällt eine deutlich niedrigere Anzahl der Nennungen. Vier Teilnehmer gaben als überwiegende Beschäftigung „Sonstiges“ an.

3.3.2 Auswertung der Fragebögen

In diesem Unterabschnitt wird die Auswertung der Daten im Hinblick auf die Prüfung der Hypothesen vorgenommen. Hierunter fallen die Bodenlärmbelastung und die Lärmbelastigung, die Lärmempfindlichkeit sowie die Einstellung gegenüber dem Flughafen.

3.3.2.1 Bodenlärmbelastung und Lärmbelastigung

Durch folgende Items wird die Belastigung durch Bodenlärm erfasst (vgl. Fragebogen, Anhang A.1):

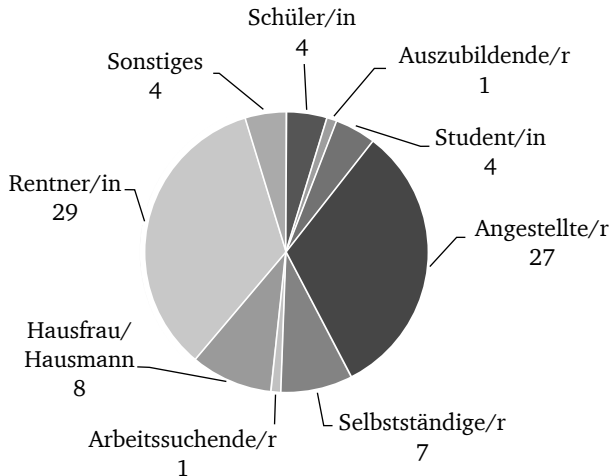


Abbildung 3.6.: Verteilung der momentanen Beschäftigung in der Gesamtstichprobe (absolute Häufigkeit).

- 1.a Wie stark haben Sie sich in den letzten 12 Monaten hier bei Ihnen zuhause durch Bodenlärm des Frankfurter Flughafens insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? (ICBEN-Item)
- 1.b Wie stark löst Bodenlärm Gefühle wie Verärgerung, Missfallen, Unbehagen oder Unzufriedenheit bei Ihnen aus?
- 1.c Wie stark löst Bodenlärm emotionalen Stress (Ängste, Aggressionen) bei Ihnen aus?
- 1.d Für wie vermeidbar halten Sie Bodenlärm?
- 1.e Als wie belästigend empfinden Sie Bodenlärm im Vergleich zum Fluglärm?
- 1.f Wie stark führt Bodenlärm dazu, dass Sie sich daheim abschotten (z. B. Fenster geschlossen halten, Garten-/Balkonnutzung einschränken)?
- 1.g Wie sehr macht es Ihnen hinsichtlich des Bodenlärms etwas aus neben dem Flughafen zu wohnen?

Die Antworten der Befragten zeigt Abbildung 3.7. In der Auswertung wird zwischen Kontrollgebiet, Stadtkern, Stadtrand und Gesamtstichprobe unterschieden.

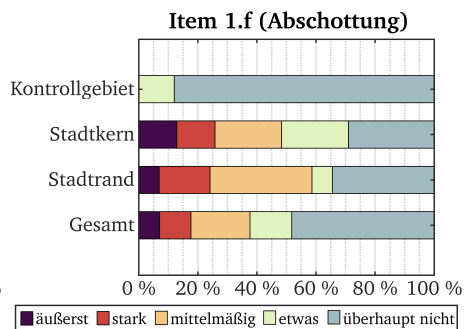
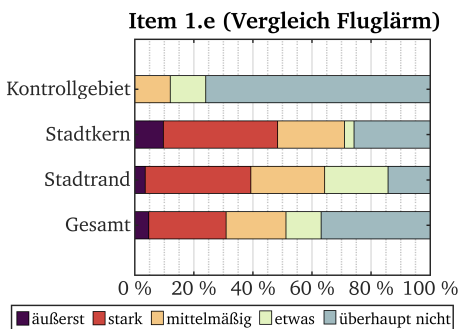
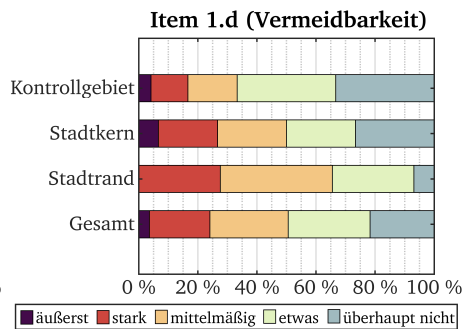
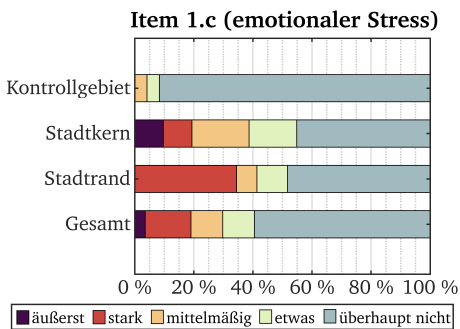
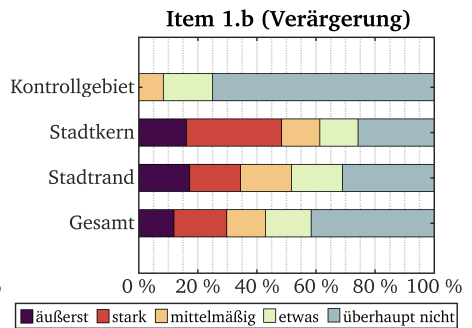
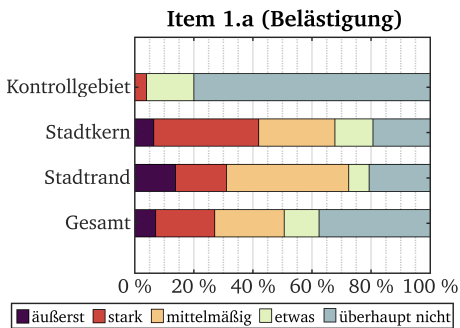
Die Antwortmöglichkeiten reichen von „äußerst“, „stark“ und „mittelmäßig“ bis zu „etwas“ und „überhaupt nicht“.

Die Ergebnisse zeigen, dass Bodenschall für die beiden Hauptuntersuchungsgebiete (Kelsterbach Stadtrand und Stadtkern) ein Thema darstellt. Die Kontrollgruppe hingegen ist überhaupt nicht bis höchstens mittelmäßig von Bodenschall betroffen. Nur Item 1.a beantwortete einer der Befragten im Kontrollgebiet mit starker Belästigung. Item 1.d ist hierbei ausgenommen, da es sich dabei um eine subjektive Einschätzung zur Vermeidbarkeit von Bodenschall handelt.

Insbesondere durch Item 1.a wird ersichtlich, dass sich 80,6 % (Stadtkern) bzw. 79,3 % (Stadtrand) der befragten Personen wenigstens etwas durch Bodenschall belästigt fühlen. Davon fühlen sich 41,9 % im Stadtkern und 31 % am Stadtrand sogar äußerst oder stark belästigt. Item 1.b zielt auf Gefühle wie Verärgerung oder Unzufriedenheit ab. Davon sind im Stadtkern 48,4 % mindestens stark betroffen. Am Stadtrand sind es 34,5 %, bei denen Bodenschall mindestens starke oder sogar äußerste Unzufriedenheit und Verärgerung hervorruft. Item 1.c zeigt, dass Bodenschall bei über der Hälfte der Befragten im Stadtkern- und Stadtrandgebiet mindestens etwas emotionalen Stress auslöst. 9,7 % der Befragten im Stadtkern fühlen sich sogar äußerst emotional gestresst. Der Großteil der befragten Personen in den Hauptuntersuchungsgebieten sagt auch aus, dass Bodenschall im Vergleich zu Fluglärm belästigender ist. Dieser Meinung sind 74,2 % im Stadtkern und 85,7 % am Stadtrand, die mindestens „etwas“ angekreuzt haben. Bodenschall führt auch dazu, dass ein Teil der Befragten sich zuhause abschottet (Item 1.f). Hier haben 71 % der Befragten im Stadtkern und 65,5 % am Stadtrand mit „etwas“, „mittelmäßig“, „stark“ oder „äußerst“ geantwortet. Die Frage, wie sehr es den Personen hinsichtlich des Bodenschalls etwas ausmacht, neben dem Flughafen zu wohnen, beantworteten 73,3 % der Befragten aus dem Stadtkern und 53,6 % aus dem Stadtrand mit mindestens „etwas“.

Ordnet man den Antwortmöglichkeiten Zahlenwerte von 1 bis 5 für die Antworten „überhaupt nicht“ bis „äußerst“ zu, so lassen sich weitere statistische Untersuchungen anstellen. Dabei stehen hohe Werte bei allen Belästigungsitems für eine hohe Belästigung.

In Abbildung 3.8 ist ein Boxplot dargestellt, der die Lärmbelästigung ICBEN für die drei Subgruppen zeigt. Der Median des ICBEN-Items (Item 1.a), das standardisiert die Belästigung durch Bodenschall misst, liegt sowohl bei der Gruppe Stadtrand als auch bei der Gruppe Stadtkern bei $Mdn = 3$. Die Kontrollgruppe weist einen Median von $Mdn = 1$ auf. Werden alle Gruppen als Gesamtstichprobe zusammengefasst, liegt der Median der Lärmbelästigung bei $Mdn = 3$ mit einem Interquartilsabstand (IQA) zwischen dem 3. und 1. Quartil von $IQA = 3$.



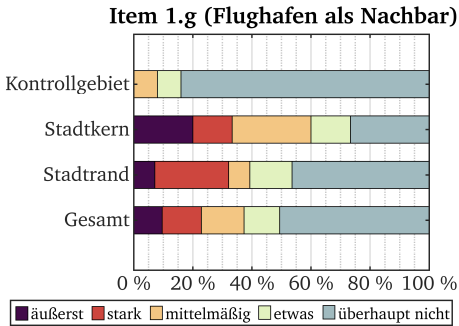


Abbildung 3.7.: Antworten der Befragten auf die Items zur Erfassung der Lärmbelästigung.

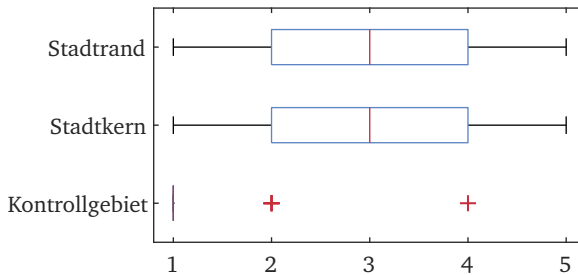


Abbildung 3.8.: Boxplot der Lärmbelästigung ICBEN für die drei Substichproben auf einem fünfstufigen Antwortformat (1 = überhaupt nicht, 2 = etwas, 3 = mittelmäßig, 4 = stark, 5 = äußerst).

Die Daten der ermittelten Lärmbelästigung weisen keine Normalverteilung auf. Dies wurde anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests und ergänzend dazu mit dem Shapiro-Wilk-Test ermittelt. Aus diesem Grund muss bei der Berechnung des Zusammenhangs zwischen Bodenlärmbelastung und Lärmbelästigung der nicht-parametrische Kruskal-Wallis-Test angewendet werden. Die Auswertung ergibt, dass in den drei Substichproben signifikante Unterschiede in der Lärmbelästigung existieren ($H(2) = 27.66, p < .05$).

Da der Kruskal-Wallis-Test nicht auswertet, zwischen welchen der Substichproben signifikante Unterschiede existieren, müssen Post-Hoc-Tests durchgeführt werden. Hierzu werden Mann-Whitney-Tests unter den einzelnen Substichproben mit der Bonferroni-Korrektur durchgeführt. Durch die Korrektur mit drei Paar-

vergleichen ($k = 3$) ergibt sich für die Post-Hoc-Tests ein neues Signifikanzniveau von $\alpha_k = \alpha/k = 0.0167$. Hieraus ergibt sich, dass zwischen Stadtrand und Stadtkern kein signifikanter Unterschied in der Lärmbelästigung festzustellen ist ($U = 459.50, z = -.153, p = .878, r = .02$). Zwischen Stadtrand und Kontrollgruppe ergibt sich ein signifikanter Unterschied in der Lärmbelästigung ($U = 110.50, z = -4.675, p < .0167, r = .64$), ebenso wie zwischen Stadtkern und Kontrollgruppe ($U = 115.50, z = -4.767, p < .0167, r = .64$).

Neben dem ICBEN-Item wurden die sechs weiteren Items, die jeweils Aspekte der Belästigung enthalten, ausgewertet. Die Werte der Items wurden anhand der Spearman Korrelation mit dem ICBEN-Item verglichen, um Zusammenhänge zu untersuchen. Tabelle 3.6 zeigt die Korrelationskoeffizienten zwischen dem ICBEN-Item und den sechs eigens entwickelten Items. Die Werte zeigen bei allen Items sehr signifikante Korrelationen. Die Korrelationskoeffizienten liegen bei der Variablen *Bel_Abschottung* (Item 1.f) am höchsten ($r = .850$). Auch die anderen Variablen zeigen sehr hohe Koeffizienten. Die Variable *Bel_Vermeidbarkeit* (Item 1.d) zeigte als Einzige einen etwas niedrigeren Korrelationskoeffizienten ($r = .452$).

Tabelle 3.6.: Korrelationen zwischen dem ICBEN-Item und den sechs eigens entwickelten Items.

| Korrelationskoeffizient r | |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| | <i>Bel_ICBEN</i> (Item 1.a) |
| <i>Bel_Gefühle</i> (Item 1.b) | .826 |
| <i>Bel_Stress</i> (Item 1.c) | .718 |
| <i>Bel_Vermeidbarkeit</i> (Item 1.d) | .452 |
| <i>Bel_Vergleich</i> (Item 1.e) | .727 |
| <i>Bel_Abschottung</i> (Item 1.f) | .850 |
| <i>Bel_Nachbarschaft</i> (Item 1.g) | .719 |

3.3.2.2 Lärmempfindlichkeit

Die Auswertung des Items zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit (Überprüfung der Hypothese H1.1) zeigt, dass der Median der Gesamtstichprobe bei $Mdn = 3$ liegt. Der Interquartilsabstand beträgt $IQA = 2$. Die Daten können anhand einer Analyse mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test als normalverteilt angesehen werden ($p > .05$). Da jedoch die Daten aus dem ICBEN-Belästigungssitem nicht normalver-

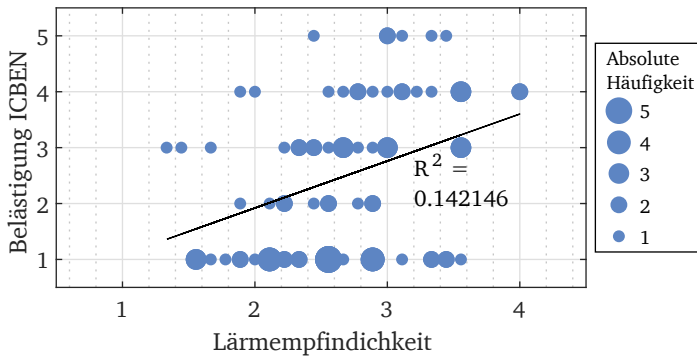


Abbildung 3.9.: Zusammenhang zwischen der mit dem ICBEN-Item gemessenen Belastung und der Lärmempfindlichkeit für die Gesamtstichprobe.

teilt sind, wird auf Spearmans Rangkorrelation zurückgegriffen, um Zusammenhänge zwischen den beiden Variablen zu überprüfen. Diese ergibt zwischen der Lärmempfindlichkeit und der Lärmbelastung eine hoch signifikante positive Korrelation ($r = .387, p < .01$). Das bedeutet, dass die Lärmbelastung mit steigender Lärmempfindlichkeit zunimmt. Abbildung 3.9 zeigt die Verteilung der Ergebnisse auf dem Streu-/Punktdiagramm. Die Größe der Punkte gibt die absolute Häufigkeit eines Datenpaares wieder. Da sich aus diesen Werten wegen der diskreten fünfstufigen Skala des Belastungsitems kein eindeutiger Trend ablesen lässt, wird eine berechnete Anpassungslinie in das Diagramm gelegt und das zugehörige Bestimmtheitsmaß R^2 angegeben. Diese Anpassungslinie zeigt den positiven Zusammenhang zwischen Lärmbelastung und Lärmempfindlichkeit.

Neben der Gesamtstichprobe wird jede Substichprobe auf die Hypothese H1.1 untersucht. Die Analyse ergibt für die am höchsten belastete Gruppe Stadtrand eine signifikante Korrelation zwischen der Lärmbelastung und der Lärmempfindlichkeit ($r = .492, p < .01$). Als etwas stärker erweist sich der Zusammenhang in der Gruppe Stadtkern ($r = .559, p < .01$). Dieser ist sogar hoch signifikant. Keine signifikante Korrelation zeigt sich hingegen in der Kontrollgruppe ($r = -.189, p > .05$).

3.3.2.3 Einstellung gegenüber dem Flughafen

In diesem Abschnitt wird überprüft, wie die Einstellung zum Flughafen mit der Lärmbelastung zusammenhängt (Hypothese H1.2). Der Median der Gesamtstichprobe liegt bei $Mdn = 4$ mit einem Interquartilsabstand von $IQA = 3$. Die Da-

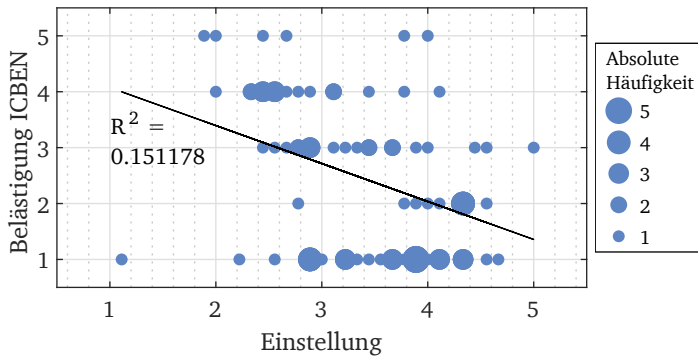


Abbildung 3.10.: Zusammenhang zwischen der mit dem ICBEN-Item gemessenen Belästigung und der Einstellung gegenüber dem Flughafen für die Gesamtstichprobe.

ten erweisen sich nach einer Analyse mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test als nicht normalverteilt ($p < .05$). Da auch die Daten des Belästigungsitems nicht normalverteilt sind, wird für die Korrelationsberechnungen erneut Spearmans Rangkorrelation verwendet. Die Berechnungen ergeben einen hoch signifikanten negativen Zusammenhang zwischen der Einstellung zum Flughafen und dem Ausmaß der Belästigung ($r = -.417, p < .01$). Das bedeutet, dass die Lärmbelästigung mit abnehmender Einstellung steigt. Abbildung 3.10 zeigt die Verteilung der Antworten auf dem Streu- / Punktdiagramm. Die Anpassungslinie zeigt den negativen Zusammenhang zwischen der Belästigung und der Einstellung. Das zugehörige Bestimmtheitsmaß R^2 wurde angegeben. Die Größe der Punkte gibt die absolute Häufigkeit eines Datenpaares an.

Neben der Gesamtstichprobe werden ebenso die einzelnen Gruppen auf Hypothese H1.2 untersucht. Diese Analyse ergibt bei der am höchsten belasteten Gruppe Stadtrand einen sehr großen negativen Zusammenhang nach Spearman zwischen Einstellung und Lärmbelästigung ($r = -.779, p < .01$). Als etwas geringer, aber dennoch signifikant erwies sich der negative Zusammenhang zwischen der Einstellung und der Lärmbelästigung in der Gruppe Stadtkern ($r = -.516, p < .01$). In der Kontrollgruppe konnte kein signifikanter Zusammenhang zwischen diesen beiden Variablen ($r = .138, p > .05$) festgestellt werden.

Eine Untersuchung der einzelnen Items gibt Aufschluss darüber, durch welche Fragen der Einstellungsskala dieser Zusammenhang besonders hervorgerufen wird. Hierbei zeigen sich die stärksten Korrelationen zwischen der Belästigung und den Items 3.c „Der Flughafen ist wichtig für die regionale Wirtschaft“ ($r = -.709$,

$p < .01$), 3.d „Der Flughafen stellt eine Belastung für die Menschen der Region dar“ ($r = -.683$, $p < .01$), 3.b „Der Flughafen ist eine Belastung für die Umwelt“ ($r = -.669$, $p < .01$) und 3.h „Der Flughafen verhilft der Region zum Wohlstand“ ($r = -.647$, $p < .01$). Keine signifikante Korrelation zeigt sich lediglich bei Item 3.e „Durch den Flughafen verlieren Grundstücke und Immobilien an Wert“ ($r = -.220$, $p > .05$).

Um zu überprüfen, ob sich die Einstellung in den drei Substichproben voneinander unterscheidet, wird der Kruskal-Wallis-Test angewendet. Laut diesem unterscheidet sich die Einstellung zum Flughafen innerhalb der drei Gruppen nicht signifikant ($H(2) = 1.106$, $p > .05$). Somit hängt die Einstellung anhand dieser Daten nicht signifikant mit der objektiven Lärmbelastung zusammen.

3.3.3 Einfluss von Störvariablen

Der Einfluss von Störvariablen sollte in den zu vergleichenden Gruppen möglichst konstant sein. Hierzu wurden die Variablen *Geschlecht*, *Alter*, *Wohndauer*, *Tägliche Aufenthaltsdauer zu Hause*, *Arbeit am Flughafen*, *Höchster Bildungsabschluss* und *Beschäftigung* erhoben. Um zu testen, ob sich der Einfluss dieser Variablen in den drei Substichproben signifikant voneinander unterscheidet, wird bei nominalskalierten Daten der Chi-Quadrat-Test und bei ordinalskalierten Daten der Kruskal-Wallis-Test angewendet. Die drei Substichproben unterscheiden sich nicht signifikant bezüglich der Variablen *Geschlecht* ($\chi^2(2) = .771$, $p > .05$), *Alter* ($H(2) = 1.750$, $p > .05$), *Wohndauer* ($H(2) = .384$, $p > .05$), *Tägliche Aufenthaltsdauer zu Hause* ($H(2) = 1.175$, $p > .05$) und *Arbeit am Flughafen* ($\chi^2(2) = 1.309$, $p > .05$). Da die Variablen *Höchster Bildungsabschluss* und *Beschäftigung* nicht in jeder Kategorie mit mindestens 5 Beobachtungen ausgefüllt wurden, kann hier kein Chi-Quadrat-Test durchgeführt werden. Aus diesem Grund werden für den Chi-Quadrat-Test die Kategorien ausgewählt, die in jeder Zelle mindestens 5 Beobachtungen aufweisen, um diese auf einen Zusammenhang mit den drei Substichproben zu überprüfen. Bei der Variablen *Höchster Bildungsabschluss* werden die Kategorien „Realschulabschluss/Mittlere Reife“ und „Hochschulabschluss (FH, HS, Uni)“ ausgewählt. Die Analyse ergibt keinen signifikanten Unterschied zwischen den Substichproben ($\chi^2(2) = .252$, $p > .05$). Bei der Variablen *Beschäftigung* werden die Kategorien „Angestellte/r“ und „Rentner/in“ in jeder Substichprobe verglichen. Die Analyse ergibt auch hier keine signifikanten Unterschiede ($\chi^2(2) = .035$, $p > .05$).

Wie sich die Störvariablen auf die Belastungsreaktion auswirken, wird mit dem Kruskal-Wallis-Test für ordinalskalierte Daten und mit dem Chi-Quadrat-Test für nominalskalierte Daten untersucht. Die Variablen *Geschlecht* ($\chi^2(4) = 4.437$, $p > .05$), *Alter* ($H(4) = 3.289$, $p > .05$), *Tägliche Aufenthaltsdauer zu Hau-*

se ($H(4) = 5.793, p > .05$) und *Arbeit am Flughafen* ($\chi^2(4) = 3.698, p > .05$) hängen nicht signifikant mit der Lärmbelästigung zusammen. Stellvertretend für die Variable *Höchster Bildungsabschluss* werden die Kategorien „Volk-/Hauptschulabschluss“, „Realschulabschluss/Mittlere Reife“ und „Hochschulabschluss (FH, HS, Uni)“ untersucht. Die Analyse zeigt keinen signifikanten Zusammenhang zwischen diesen Kategorien und der Lärmbelästigung ($\chi^2(8) = 10.712, p > .05$). Bei der Variable *Beschäftigung* werden die Kategorien „Angestellte/r“ und „Rentner/in“ ausgewählt. Die Analyse ergibt auch hier zwischen diesen Kategorien und der Lärmbelästigung keinen signifikanten Zusammenhang ($\chi^2(4) = 9.032, p > .05$). Die Variable *Wohndauer* zeigt auf Basis des Kruskal-Wallis-Tests ebenfalls keinen signifikanten Zusammenhang ($H(4) = 9.233, p = .056$) zur Lärmbelästigung. Der p -Wert liegt aber nur knapp über dem Signifikanzniveau. Mit dem Jonckheere-Terpstra-Test lässt sich jedoch ein Trend in den Medianen der Wohndauer nachweisen. Je belästigter die Befragten von Bodenlärm sind, desto höher ist der Median der Wohndauer ($J = 1726, z = 3.023, p = .003, r = .38$).

Die Ergebnisse dieser Analysen zeigen, dass sich die erhobenen Kontrollvariablen in den drei Untersuchungsgruppen nicht signifikant unterscheiden und somit vernachlässigt werden können. Die Variable *Wohndauer* zeigt hingegen einen Zusammenhang mit der Lärmbelästigung.

3.4 Diskussion der Befragungsergebnisse

In diesem Abschnitt wird zunächst auf die Interpretation der ermittelten Ergebnisse eingegangen. Anschließend folgt die inhaltliche und methodische Bewertung.

3.4.1 Interpretation

Der Median der über das ICBEN-Item gemessenen Belästigung liegt in den Hauptuntersuchungsgruppen mit $Mdn = 3$ im Mittelwert der Skala. Damit liegt die Vermutung nahe, dass in der Gesamtstichprobe unter den Anwohnern ein insgesamt mittleres Belästigungsempfinden vorherrscht. Es gibt jedoch auch viele Personen, die ein deutlich höheres oder deutlich niedrigeres Belästigungsempfinden vorweisen.

Anhand der Substichproben Stadtkern und Stadtrand, die einer unterschiedlichen Bodenlärmbelastung ausgesetzt sind, kann die vermutete Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht repliziert werden. Beide Gruppen unterscheiden sich in ihrem Belästigungsempfinden nicht signifikant voneinander. Lediglich die Kontrollgruppe unterscheidet sich hierin signifikant von den anderen beiden Gruppen. Hypothese H1 („Anwohner, die durch ihre Wohnlage einer höheren Bodenlärmbelastung

ausgesetzt sind, berichten ein höheres Belästigungsempfinden durch Bodenlärm als Anwohner, die durch ihre Wohnlage einer niedrigeren Bodenlärmbelastung ausgesetzt sind.“) kann mit dieser Befragung nicht bestätigt werden. Demnach kann nicht davon ausgegangen werden, dass die vom Bodenlärm höher belästigten Personen auch in den Gebieten höherer Bodenlärmbelastung wohnen. Die Lärmbelastung durch Bodenlärm scheint somit etwas Individuelles zu sein.

Neben dem von ICBEN formulierten Item zur Erfassung von Belästigung werden in dieser Arbeit sechs weitere Items verwendet, die jeweils Aspekte der Belästigung durch Bodenlärm enthalten. Es zeigt sich, dass alle Items signifikant mit dem ICBEN-Item korrelieren. Die Korrelationskoeffizienten zeigen sehr hohe Werte, mit Ausnahme des Items 1.d „Für wie vermeidbar halten Sie den Bodenlärm?“. Dies verdeutlicht, dass diese Items in Zusammenhang mit der Bodenlärmbelastung stehen und sich nach Prüfung mit tiefer gehenden Analysen möglicherweise dazu eignen, um in einem Fragebogen für Bodenlärm integriert zu werden.

Es wird zudem festgestellt, dass es einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Lärmempfindlichkeit und der Lärmbelastung durch Bodenlärm gibt. Die positive Korrelation lässt sich dahingehend interpretieren, dass die Lärmbelastung mit zunehmender Lärmempfindlichkeit steigt. Die Korrelationen der beiden Variablen weisen in den Hauptuntersuchungsgruppen jeweils Werte um 0.5 auf und können demnach als mittlere Korrelationen interpretiert werden. In der Kontrollgruppe ergibt sich dieser Effekt erwartungsgemäß nicht, da diese fast ausschließlich nichtbelästigte Personen umfasst. Die Hypothese H1.1 (*„Bei gegebener Bodenlärmbelastung ist die empfundene Belästigung der Anwohner höher, wenn eine höhere Lärmempfindlichkeit vorliegt.“*) wird somit vorläufig bestätigt.

Der Median der Einstellungsskala liegt mit $Mdn = 4$ ($IQA = 3$) über dem Skalenmittelpunkt. Die erhobene Stichprobe besitzt im Mittel somit eine eher positive Einstellung gegenüber dem Flughafen. Ebenso wird festgestellt, dass es einen signifikanten Zusammenhang zwischen der Einstellung zum Flughafen und der Lärmbelastung durch Bodenlärm gibt. Es ergibt sich ein negativer Zusammenhang, was bedeutet, dass die Lärmbelastung mit sinkender Einstellung bzw. steigender negativer Einstellung zunimmt. Die beiden Variablen korrelieren in den Hauptuntersuchungsgruppen mit etwa 0.5 im Stadtkern und beinahe 0.8 am Stadtrand. Hier liegen stärkere Korrelationswerte vor als zwischen Lärmempfindlichkeit und Lärmbelastung. Die Kontrollgruppe weist erwartungsgemäß keine signifikante Korrelation auf. Hieraus ergibt sich ebenfalls eine große Effektstärke, die verglichen mit der Lärmempfindlichkeit als noch größer interpretiert werden kann. Hypothese H1.2 (*„Bei gegebener Bodenlärmbelastung ist die empfundene Belästigung der Anwohner höher, wenn eine negative Einstellung vorliegt.“*) wird somit vorläufig bestätigt.

3.4.2 Inhaltliche Bewertung

Warum die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Lärmbelastung und der Lärmbelästigung nicht repliziert werden konnte, kann verschiedene Ursachen haben. Eine Ursache könnte die Ungenauigkeit der Messung einer der beiden Variablen sein. Die Erfassung der Lärmbelastung wurde anhand des energieäquivalenten Dauerschallpegels $L_{eq}(3)$ vorgenommen. Wie im Unterabschnitt 2.6.3 erläutert, gibt es in der Literatur Hinweise darauf, dass die Häufigkeit von Lärmereignissen oder auch der Maximalschalldruckpegel eine Lärmbelästigung gut erklären können. Ein Grund für die Messungenauigkeit der Lärmbelästigung könnte darin liegen, dass diese nur anhand einer Frage gemessen wird. Ein Item allein kann nicht alle Aspekte der Belästigung erfassen und abbilden, weshalb in dieser Arbeit ein erster Versuch unternommen wurde, Bodenlärm anhand von weiteren Items differenzierter darzustellen. Die Ergebnisse ergeben durch die hohen Korrelationskoeffizienten gute Voraussetzungen für weitere, tiefgehendere Untersuchungen zur Entwicklung eines Bodenlärmbelästigungskonstrukts.

Neben einer Messungenauigkeit könnte das Antwortverhalten zu einem nicht signifikanten Zusammenhang zwischen Lärmbelastung und Lärmbelästigung geführt haben. Die Anwohner aus Regionen mit weniger Lärmbelastung reagierten mit höheren Belästigungsausprägungen. Die Anwohner aus Regionen mit größerer Lärmbelastung antworteten mit niedrigeren Belästigungswerten, als sie möglicherweise empfanden. Die Verzerrung könnte dadurch entstanden sein, dass Anwohner mit ihren Aussagen entsprechende Studienergebnisse erzeugen wollten. Dies könnte für beide Richtungen gelten. Vor dem Hintergrund der Flughafenerweiterungen der letzten und kommenden Jahre könnte diese Vermutung aber vorrangig für Flughafengegner zutreffen. Zu ähnlichen Schlüssen kommt auch die Lärmstudie von Sommerfeld [50].

Eine Verzerrung der Ergebnisse könnte zudem dadurch entstanden sein, dass am Stadtrand eine deutlich höhere relative Häufigkeit von Flughafenangestellten befragt wurde. Die absoluten Häufigkeiten der befragten Flughafenangestellten fallen verglichen mit der gesamten Stichprobengröße aber sehr gering aus. Daher kann davon ausgegangen werden, dass hierdurch maximal eine geringfügige Verschiebung der Ergebnisse entsteht.

Zu einem nicht signifikanten Zusammenhang zwischen Belästigung und Belastung könnte auch der Umstand geführt haben, dass Anwohner über unterschiedliche passive Schallschutzmöglichkeiten verfügen. Demnach könnten Anwohner, die in höher belasteten Gebieten wohnen, einen stark reduzierten Schalldruckpegel bewertet haben infolge des guten Schallschutzes ihres Hauses. Die Betroffenen haben hierbei vermutlich die kompensatorische Wirkung des Schallschutzes außer

Acht gelassen. Dies könnte erklären, warum dort die Belästigungsreaktion allgemein zu niedrig ausfiel, um ein Signifikanzniveau zu erreichen. Gleiches könnte für den umgekehrten Fall gelten: Anwohner in weniger belasteten Gebieten könnten aufgrund eines schwächeren passiven Schallschutzes ihrer Häuser einen höheren Schalldruckpegel bewertet haben.

Eine weitere Begründung für die nicht replizierte Dosis-Wirkungs-Beziehung könnte im Begriff Bodenlärm selbst liegen. Im Vergleich zum Fluglärm ist Bodenlärm ein weniger verbreiteter Begriff und erklärt sich nicht intuitiv. Demnach könnten Probanden trotz Definition der Begrifflichkeiten ihre durch Fluglärm beeinflusste Belästigung wiedergegeben haben. Gleichzeitig dürfte es für Anwohner auch schwierig sein, aufkommenden Lärmereignissen stets eine Ursache zuzuordnen. Diese Schwierigkeit könnte bei Fluglärm allerdings geringer ausfallen als bei Bodenlärm, da Fluglärm von oben kommt. Am Boden existieren neben dem Flughafen noch weitere Lärmquellen, wie Straßen- oder Schienenverkehr. Dies kann zu Verzerrungen der Ergebnisse führen.

Es könnte außerdem sein, dass nicht jeder Studienteilnehmer den Begriff Bodenlärm gleichermaßen verstanden hat. Diese Vermutung drängt sich durch einige wenige Nachfragen von Anwohnern auf. Darunter fällt beispielsweise die Annahme, dass Bodenlärm den vom Flughafen zusätzlich produzierten Güterverkehr auf öffentlichen Straßen beinhaltet. Manche Befragten könnten also unter Bodenlärm intuitiv etwas anderes verstanden haben und somit auf das Lesen der Definitionen verzichtet haben. Da die Interviewer aber darauf geschult waren, bei der Rekrutierung auf eine klare Definition der Begrifflichkeiten zu achten, dürfte dieser Effekt nicht ausschlaggebend sein.

Bei der Untersuchung der Störvariablen fällt auf, dass die Wohndauer signifikant mit der Belästigung zusammenhängt, jedoch nicht besonders stark. Je länger die Teilnehmer an ihrem aktuellen Wohnort wohnen, desto höher fallen tendenziell die Belästigungswerte aus. Dieser Umstand überrascht nicht, da er sich mit dem Dosis-Wirkungs-Prinzip übereinstimmen lässt. Eine Dosis bildet sich nicht nur nach der Stärke der Belastung, sondern auch nach der Zeit des Einwirkens. Auch Fields schließt in [36] darauf, dass die Wohndauer einen Einfluss auf die Lärmbelästigung hat, wenn auch keinen starken. Der Zusammenhang könnte aber auch noch einen anderen Grund haben: Studienteilnehmer, die bereits länger in der Nachbarschaft des Flughafens wohnen, haben über die Zeit miterlebt, wie der Flughafen wächst. Menschen, die später zugezogen sind, müssten die Problematik des Flughafennahbereiches bereits gewusst haben. Es könnte also auch die Erwartung an das Wohnumfeld einen Einfluss auf die Belästigung durch Bodenlärm haben.

Der Einfluss nicht-akustischer Variablen auf das Belästigungsempfinden, wie die Einstellung gegenüber dem Flughafen oder die individuelle Lärmempfindlichkeit,

werden ebenfalls analysiert. Die Werte aus der Einstellungsskala gegenüber dem Flughafen korrelieren negativ mit den Belästigungswerten durch Bodenlärm. Je positiver die Einstellung, desto weniger fühlen sich die Befragten belästigt. Korrelationen zeigen jedoch lediglich Zusammenhänge auf und können keine Kausalität erklären [54, S. 129f.]. Demnach kann aufgrund dieser Ergebnisse nicht darauf geschlossen werden, dass die Einstellung von der Lärmbelästigung oder umgekehrt beeinflusst wird. In der Literatur ist der Einfluss der Einstellung gegenüber einer Lärmquelle auf das Belästigungsurteil bereits durch viele Untersuchungen belegt. Bereits eine Studie von Schreckenberg und Meis [55] sieht in einem integrativen Lärmmanagement Chancen, um Lärmbelästigungen zu senken. Sollte die Einstellung die Lärmbelästigung beeinflussen, könnte sich schon durch eine Verbesserung der Einstellung zum Flughafen eine geringere Lärmbelästigung einstellen, trotz gleichbleibender Lärmbelastung.

Auch der zweite erhobene, nicht-akustische Faktor Lärmempfindlichkeit korreliert signifikant mit der Lärmbelästigung. Lärmempfindlichkeit kann beim Betroffenen als konstant und als generelle Persönlichkeitseigenschaft angesehen werden [36]. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass diese nicht von der Belästigung durch Bodenlärm beeinflusst wird, sondern sich die Wirkrichtung umgekehrt verhalten muss. Die individuelle Lärmempfindlichkeit beeinflusst demnach die Belästigung und kann somit erklärend dazu beitragen, warum in den höher durch Bodenlärm belasteten Gebieten nicht mehr Befragte höhere Belästigungswerte angaben.

3.4.3 Methodische Bewertung

Die Auswahl der Methodik kann zu Störeinflüssen auf die Ergebnisse führen, die im Folgenden diskutiert werden.

Ein methodischer Grund für den in dieser Studie nicht signifikant gewordenen Zusammenhang zwischen Bodenlärmbelastung und Belästigungsempfinden gegenüber Bodenlärm, könnte die Auswahl der Hauptuntersuchungsgruppen Stadtrand und Stadtkern sein. Dies könnte an der räumlichen Nähe der beiden Gebiete liegen, die eine sehr ähnliche Belastung durch Bodenlärm in Teilen der Gruppen aufweisen. Um ein signifikantes Ergebnis zu erzielen, wäre möglicherweise eine größere räumliche Distanz zwischen beiden Gruppen besser. Die Auswahl der Kontrollgruppe zeigte hingegen die erwarteten Ergebnisse.

Die Bestimmung der Untersuchungsgebiete war durch die vorhandenen Messstationen und die Ausrichtung des Flughafens eingeschränkt und ließ im Nahbereich nicht viele Alternativen zu. Da Fluglärm im Vergleich zu Bodenlärm ein in der Bevölkerung deutlich breiter diskutiertes Thema darstellt, sind die Orte der Messstationen des DFLD und der Fraport zumeist an den Flugrouten ausgerichtet.

Dies ist eine Einschränkung hinsichtlich der Auswahl an Stationen mit Bodenlärmbelastung. Weiterhin muss beachtet werden, dass Messwerte von einigen wenigen Messorten als pauschal für die Gruppe geltend herangezogen wurden. Genauer wären hierbei Messwerte für jeden einzelnen Teilnehmer, was aber in der methodischen Gestaltung bei einer Feldstudie wie dieser nicht umsetzbar ist.

Zur Bewertung der Schalldruckpegelmesswerte muss beachtet werden, dass die Messstationen jegliche Umweltgeräusche registrieren. Die Werte entstehen demnach stets aus einer Überlagerung von Bodenlärm mit Fluglärm und sonstigen Verkehrsgeräuschen. Daher ist die Bestimmung der Belastung durch Bodenlärm sehr schwierig. Die Fraport AG versuchte ab Ende 2014 für einige Monate über aufwendig betriebene mobile Messstationen, Bodenlärm in Walldorf zu erfassen, der vor allem von der Triebwerksprobelaufeinrichtung im Süden des Flughafens emittiert wird (vgl. [56]). Über den Messzeitraum konnten praktisch keine Messereignisse von Probelaufen erkannt werden. Weil die Messungen auf Antrag der Stadt Mörfelden-Walldorf durchgeführt wurden, lässt sich vermuten, dass eine ausreichende Anzahl an Menschen Lärm wahrnimmt. Diesen ordnen sie direkt dem Flughafen zu. Eine solche Diskrepanz zwischen den Messergebnissen und der vermuteten Wahrnehmung vieler Bürger zeigt die grundsätzliche Schwierigkeit, die in der angemessenen Erfassung von Bodenlärm liegt.

Die Art der Rekrutierung könnte ebenso zu einer Verzerrung der Ergebnisse geführt haben. Obwohl über den Einsatz mehrerer geschulter Interviewer versucht wurde, den Interviewereffekt zu mindern, kann dieser nicht gänzlich ausgeschlossen werden. Da die Teilnehmer jedoch nicht direkt befragt wurden, wird dieser als vergleichsweise gering eingeschätzt. Durch die fehlende direkte Befragung hingegen, könnten die Ergebnisse weiteren Störeinflüssen unterlegen sein, die durch eine nicht kontrollierte Interviewsituation entstehen. Hierbei könnten etwa Dritte Einfluss auf die Befragung genommen haben. Mithilfe einer genauen Einführung der Teilnehmer durch den Interviewer sollten diese Effekte vermieden werden.

Des Weiteren entstand während der Rekrutierung Kontakt zu einer Vielzahl von Anwohnern. Einige, denen die Teilnahme an der Studie angeboten wurde, reagierten mit ablehnender Haltung. Die Begründungen hierfür waren häufig, dass sie kein Problem mit dem Flughafen hätten. Auch wollten einige Personen nicht an der Studie teilnehmen, weil sie am Flughafen arbeiteten. Bei der Interpretation der Ergebnisse sollten diese Beobachtungen berücksichtigt werden. Es ist daher denkbar, dass in der Stichprobe ein höherer Anteil an Teilnehmern mit kritischer Einstellung dem Flughafen gegenüber vorliegt. Diese Problematik tritt womöglich verstärkt durch negativ konnotierte Begriffe wie „Lärm“ bei der Erklärung des Forschungsvorhabens auf. Beim Thema Bodenlärm lassen sich negativ konnotierte Begriffe nicht gänzlich vermeiden, jedoch ist bei künftigen Rekrutierungen in

diesem Themengebiet darauf zu achten, dass stets so neutral wie möglich formuliert wird. Im Rahmen der Interviews fiel zudem auf, dass bei vielen Anwohnern ein Bedürfnis bestand, sich über den Fragebogen hinaus mitzuteilen. Hierbei wurden vielfach Eindrücke über Charakteristika des Bodenlärms geteilt. Hauptsächlich über nächtlichen Bodenlärm wurde sich häufig beklagt. Auch die frühen Morgenstunden vor Ende des Nachtflugverbots wurden oft genannt, da sich dann viele Flieger einreihen, um auf die Startfreigabe zu warten.

Die Gesamtstichprobengröße kann nicht als repräsentativ angesehen werden. Auch das Durchschnittsalter liegt mit über 52 Jahren deutlich über dem bundesdeutschen Durchschnitt, der bei etwa 44 Jahren liegt [57, S. 2]. Die ermittelten Ergebnisse dieser Studie können demnach nicht als allgemeingültig aufgefasst werden.

3.4.4 Zusammenfassung und Zwischenfazit

Mittels einer schriftlichen Befragung wurde ermittelt, ob Anwohner des Flughafens Frankfurt Bodenlärm wahrnehmen und sich dadurch belästigt fühlen. Dabei wurde anhand von Hypothesen untersucht, inwieweit die *Bodenlärmbelastung* durch den Flughafen und die *Belästigung* der Anwohner zusammenhängt. Des Weiteren wurde der Einfluss der Variablen *Einstellung zum Flughafen* und *individuelle Lärmempfindlichkeit* auf die Lärmbelästigung analysiert. Dazu wurden auf Grundlage von Schalldruckpegelmesswerten zwei Hauptuntersuchungsgebiete (Kelsterbach Stadtstrand und Stadtkern) sowie ein Kontrollgebiet in Mörfelden-Walldorf identifiziert und befragt.

Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigen keinen signifikanten Unterschied bezüglich der Lärmbelästigung zwischen den beiden Hauptuntersuchungsgebieten in Kelsterbach und können somit die Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht replizieren. Dennoch ergaben sich signifikante Unterschiede in der Lärmbelästigung zwischen den beiden Hauptuntersuchungsgebieten und der Kontrollgruppe. Die Ergebnisse zeigen, dass das Thema Bodenlärm deutliche Relevanz besitzt. Anwohner der beiden Hauptuntersuchungsgebiete in Kelsterbach, die aufgrund der Wohnlage zum Flughafen weniger durch Fluglärm belastet sind, nehmen Bodenlärm wahr und fühlen sich dadurch belästigt. Mehr als 36 % der Befragten fühlen sich sogar mindestens „stark“ belästigt. Die dem Bodenlärm zugeordneten Geräusche können bei den Befragten Verärgerung und Unzufriedenheit sowie emotionalen Stress auslösen. Ein Teil der Befragten neigt dazu, sich zu Hause abzuschotten. Die Kontrollgruppe hingegen ist überhaupt nicht bis höchstens mittelmäßig von Bodenlärm betroffen. Zudem konnte gezeigt werden, dass es Zusammenhänge zwischen der

Einstellung zum Flughafen bzw. der Lärmempfindlichkeit und der Lärmbelästigung gibt.

Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass es einen maßgeblichen Bedarf gibt, Bodenlärm zu reduzieren. Die Vermutung liegt nahe, dass die Einführung des TaxiBots und die damit verbundene Verfahrensänderung (Triebwerke werden erst kurz vor Abflug gestartet) Potenzial hat, einen Beitrag zur Reduzierung des Bodenlärms zu leisten. Die Untersuchung dieses Potenzials wird in den folgenden Kapiteln dieser Arbeit dargestellt.

4 Akustische Messungen zur Untersuchung operationeller Schleppverfahren

Der neuartige pilotengesteuerte Flugzeugschlepper TaxiBot verspricht, Flugzeugbewegungen am Boden leiser, effizienter und schadstoffärmer zu gestalten. Um den akustischen Vorteil des operationellen Schleppens gegenüber Flugzeugen, die mittels Triebwerkschub rollen, zu ermitteln, werden am Flughafen Frankfurt Schallmessungen durchgeführt. Dafür werden repräsentative Testkonfigurationen festgelegt und einander gegenübergestellt. Da für die akustische Vermessung bisher keine standardisierte Vorgehensweise existiert, werden zwei Messmethoden auf Basis vergleichbarer Normen (z. B. für Flug- und Straßenverkehrsgeräusche) entwickelt und an die am Flughafen gegebenen Rahmenbedingungen sowie Sicherheitsanforderungen angepasst. Die erste Messmethode ermöglicht die Ermittlung des Geräuschpegels von Vorbeifahrten verschiedener Konfigurationen mit konstanter Geschwindigkeit (z. B. konventionell rollendes Flugzeug und Flugzeug, das vom TaxiBot gezogen wird). Mithilfe der zweiten Messmethode können stehende Flugzeugschlepper bei Leerlaufdrehzahl des Motors vermessen werden.

4.1 Analyse der Anforderungen an die akustischen Messungen

Die Anforderungen an die akustische Vermessung der Testkonfigurationen können in sieben Kategorien aufgeteilt werden (siehe Abbildung 4.1). Die Normen und Standards für die Messung von Verkehrs- und Fluggeräuschen liefern Vorgaben an das Messequipment, das Prüfverfahren, die Messumgebung und die meteorologischen Bedingungen. Die operationellen Anforderungen und Anforderungen hinsichtlich der Sicherheit ergeben sich vor allem aus Gesprächen mit Experten der Lufthansa LEOS und Fraport AG. Das Budget wird durch den Rahmen des dieser Arbeit zugrundeliegenden Förderprojekts Airport eMove festgesetzt. Im Wesentlichen werden folgende Anforderungen an die akustischen Messungen gestellt:

- Messequipment der Leistungsklasse 1
- Mobiler und auf eine lange Akku-Laufzeit ausgelegter Messrechner

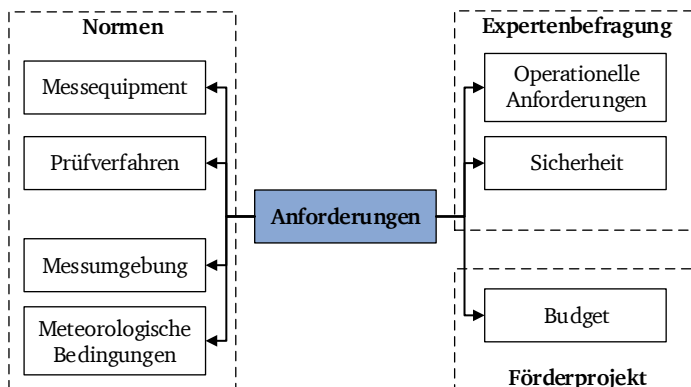


Abbildung 4.1.: Kategorisierung der Anforderungen an die akustischen Messungen. [Eigene Darstellung]

- Reproduzierbares Prüfverfahren und ein in kurzer Zeit auf- und abbaubares Messsetup
- Messungen unter Freifeldbedingungen und mit einem ausreichend niedrigen Hintergrundgeräuschpegel (mind. 10 dB, vorzugsweise 15 dB unterhalb des Schalldruckpegels der zu untersuchenden Schallquelle)
- keine Behinderung des laufenden Betriebs am Flughafen

Eine detaillierte Auflistung aller Anforderungen unter Angabe ihrer Quelle (falls zutreffend) ist im Anhang B.1, Tabelle B.1, zu finden. Die Anforderungen wurden im Rahmen von Vortests umgesetzt, geprüft und gegebenenfalls angepasst.

4.2 Messmethodik

Aus den Ergebnissen der Anforderungsanalyse in Abschnitt 4.1 werden zwei Messmethoden entwickelt, die es ermöglichen, das operationelle Schleppen und die Technologie TaxiBot in unterschiedlichen Testkonfigurationen zu bewerten. Die folgenden Unterabschnitte beschreiben die Konzeptionierung der Messkampagne, die Messmethode für Vorbeifahrten sowie die Messmethode für Messungen im Stand und das verwendete Messequipment. Weiterhin werden die Vortests und die Durchführung der Messkampagne beschrieben. Abschließend folgt die Darstellung der Datenaufbereitung.

4.2.1 Konzeptionierung der Messkampagne

Die akustische Untersuchung des operationellen Schleppens bzw. der Technologie TaxiBot erfolgt anhand von Testkonfigurationen. Tabelle 4.1 fasst diese Testkonfigurationen zusammen.

Tabelle 4.1.: Testkonfigurationen zur akustischen Bewertung des operationellen Schleppens.

| Konfiguration | Beschreibung | |
|----------------------------------|--|--|
| AETO B737-500 | Rollen einer Boeing B737-500 mit laufenden Triebwerken als Referenz. | <u>Messmethode 1:</u> Messung der Vorbeifahrt |
| DT (TW aus, APU an) | TaxiBot-B737-Gespann mit ausgeschalteten Triebwerken (TW) und eingeschalteter APU. | |
| DT (TW an, APU an) | TaxiBot-B737-Gespann mit laufenden Triebwerken und eingeschalteter APU, um ein Warmlaufen der Triebwerke während des DT zu simulieren. | |
| Vergleichs- schlepper einzeln | Goldhofer AST-2 ohne Flugzeug, um die An- und Abfahrt zu einem Auftrag zu untersuchen. | |
| TaxiBot einzeln | TaxiBot ohne Flugzeug, um die Anfahrt zu einer Flugzeug-Abstellposition oder die Abfahrt von der Abkoppelposition zum nächsten Auftrag abzubilden. | |
| Vergleichs- schlepper Stand | Goldhofer AST-2 als Vergleichsschlepper stehend mit Motor im Leerlauf. | <u>Messmethode 2:</u> Messung im Stand |
| TaxiBot Stand | TaxiBot stehend mit Motor im Leerlauf. Dies kommt beim Warten des Schlepperfahrers auf den nächsten Auftrag oder kurz vor dem An- bzw. nach dem Abkoppeln vor. | |

Da das DT eine Alternative zum AETO darstellt, sind dies die beiden ersten Testkonfigurationen. Hierfür wird das Rollen eines Flugzeugs mit laufenden Triebwerken mit der Vorbeifahrt eines TaxiBot-Flugzeug-Gespans mit laufender APU verglichen. Die APU stellt, wie auch die Triebwerke, eine Hauptschallquelle dar. Standardmäßig werden beim DT die Triebwerke erst auf der Abkoppelposition, kurz vor der Startbahn, gestartet und laufen dort warm. Um Zeit einzusparen, ist es jedoch auch denkbar, die Triebwerke bereits während des DT, kurz vor Erreichen der Abkoppelposition, zu starten. Diese Testkonfiguration (DT mit laufenden

Triebwerken und laufender APU) soll ebenfalls untersucht werden. Für die Messungen steht ein Flugzeug der Lufthansa Technical Training vom Typ Boeing B737-500 zur Verfügung. Als Vergleichsschlepper für den TaxiBot wurde der konventionelle Dieselschlepper AST-2 von Goldhofer gewählt. Dieser ist ebenfalls für die B737-500 zertifiziert und wird für die Durchführung des Pushbacks eingesetzt. Da ein Schlepper bei der An- und Abfahrt von einem Auftrag ebenfalls Schall emittiert, werden auch Vorbeifahrten der beiden Schlepper ohne Flugzeug gemessen. Zusätzlich müssen die Schlepper häufig Wartezeiten überbrücken, wenn der Schlepperfahrer auf den nächsten Auftrag wartet oder die Freigabe zum Ankoppeln des Flugzeugs noch nicht erfolgt ist. Um dies abzubilden, werden die Schlepper im Stand vermessen. Dabei läuft der Dieselmotor im Leerlauf.

Um alle Testkonfigurationen abzubilden, sind zwei unterschiedliche Messmethoden erforderlich. Mit der ersten Messmethode sollen Vorbeifahrten untersucht werden. Es wird eine bewegte Quelle mit einem feststehenden Mikrofon vermessen. Die zweite Messmethode soll sich für die Vermessung eines stehenden Schleppers eignen. Dabei wird das Mikrofon auf zahlreichen Messpositionen in kurzer Distanz um die Schallquelle herum bewegt. Nachfolgend werden beide Messmethoden im Detail beschrieben.

4.2.1.1 Messmethode zur quantitativen Beurteilung des Vorbeifahrtgeräusches (Messmethode 1)

Mit der Messmethode für Vorbeifahrten sollen die ersten fünf Testkonfigurationen akustisch vermessen werden. Daher muss der Messaufbau sowohl für Vorbeifahrten eines Flugzeugs vom Typ B737-500 bzw. des entsprechenden Flugzeug-TaxiBot-Gespans als auch für Schleppervorbeifahrten ohne Flugzeug geeignet sein.

Die Messmethode für Vorbeifahrten der Konfiguration „AETO B737-500“ ist in Abbildung 4.2 dargestellt. DIN 45642 [58] gibt vor, dass die Messdauer mindestens die Zeit umfassen muss, in der der Schalldruckpegel den maximalen Vorbeifahrtpegel (L_{\max}) um weniger als 10 dB unterschreitet. Das heißt eine Messung ist dann gültig, wenn der Schalldruckpegel während der Vorbeifahrt der jeweiligen Konfiguration um mindestens 10 dB bis L_{\max} ansteigt und um mindestens 10 dB wieder abfällt. Basierend auf dieser Vorgabe wird die Länge des Messfensters auf 100 m geschätzt und vorab festgelegt. Diese Annahme wird im Rahmen der Vor-Tests überprüft und ggf. angepasst (vgl. Unterabschnitt 4.2.3). Die Messfensterlänge entspricht in etwa der dreifachen Länge einer B737-500 bzw. des Flugzeug-TaxiBot-Gespans. Dabei beträgt die Länge des Flugzeugs 31 m und die Länge des Gespans 32,5 m. Die Breite des Messfensters beträgt 45 m und ergibt sich aus der Breite des Flugzeugs (30 m) und dem Abstand des Messmikrofons zur Flügelspitze (7,5 m).

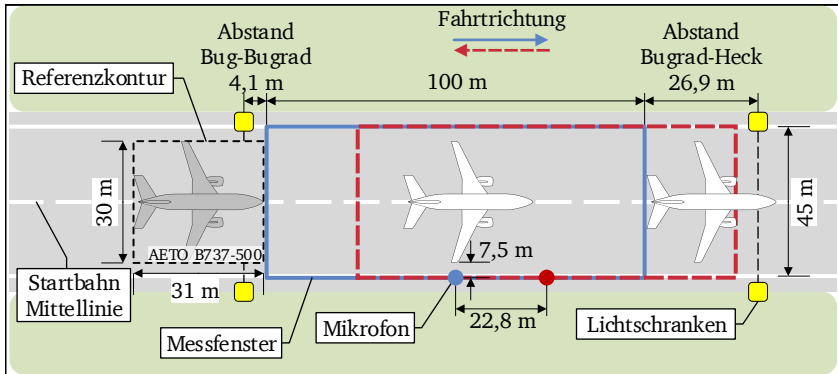


Abbildung 4.2.: Messmethode für das Vorbeifahrtgeräusch einer mittels Triebwerk-schub rollenden B737-500 (AETO). [Eigene Darstellung]

Obwohl die Normen für Messungen von Vorbeifahrten einen horizontalen Messabstand von $(7,5 \pm 0,05)$ m zur Fahrzeuglängsachse fordern (vgl. Anhang B.1, Anforderung 2.4.), kann dieser Abstand nicht realisiert werden, da von Flugzeug- und Triebwerkherstellern Sicherheitsabstände zu den Triebwerken und Flügelspitzen vorgegeben werden. Das Mikrofon wird daher in einem Abstand von $(7,5 \pm 0,05)$ m zur Flügelspitze positioniert. Es befindet sich mittig auf der langen Seite des Messfensters und wird in einer Höhe von $(1,2 \pm 0,02)$ m über der Fahrbahnoberfläche montiert. Die Bezugsachse des Mikrofons ist horizontal und senkrecht zur Startbahnmittellinie ausgerichtet.

Die sich bewegende Schallquelle kann durch eine rechteckige Referenzkontur abstrahiert werden. Solange sich die Referenzkontur im definierten Messfenster befindet, erfolgt eine automatisierte Aufzeichnung der Messdaten durch die Verwendung von Infrarot-Lichtschranken. Die Lichtschranken befinden sich in einer Höhe von $(1,0 \pm 0,02)$ m über dem Boden. Die Entfernung der beiden Sender-Empfänger-Einheiten voneinander ist abhängig von der Vorbeifahrtkonfiguration. Zur Vermessung des Rollvorgangs, müssen die Einheiten in einer Entfernung von 131 m (Messfensterlänge von 100 m plus Flugzeuglänge von 31 m) positioniert werden. Da die Höhe der Lichtschranken über dem Boden 1 m beträgt, lösen diese erst aus, wenn das Bugrad des Flugzeugs die Lichtschranke passiert. Der Abstand zwischen Flugzeugbug und Bugrad beträgt 4,1 m. Das heißt, das eigentliche Messfenster beginnt erst 4,1 m hinter der Lichtschranke. Um die Messung dann zu stoppen, wenn das Flugzeugheck das Messfenster von 100 m Länge verlassen hat, muss die zweite Lichtschranke 26,9 m hinter dem Messfenster aufgestellt

Um die Einzelvorbeifahrten des TaxiBots bzw. des Vergleichsschleppers zu vermessen, muss für die Entfernung der Lichtschranken die Länge des jeweiligen Schleppers berücksichtigt werden. Der TaxiBot hat eine Länge von 9 m, der Goldhofer AST-2 eine Länge von 8,5 m. Damit müssen die Lichtschranken 109 m bzw. 108,5 m voneinander entfernt aufgestellt werden. Abhängig von der Vorbeifahrtrichtung, muss auch hier das Mikrofon jeweils um die entsprechende Fahrzeuglänge verschoben werden. Obwohl bei den Messungen kein Sicherheitsabstand eingehalten werden muss, beträgt der Abstand des Messmikrofons von der Bahnmittellinie aus Gründen der Vergleichbarkeit ebenfalls 22,5 m.

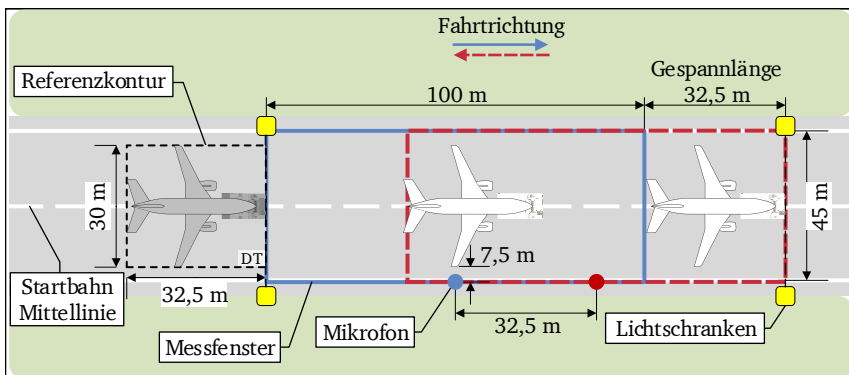


Abbildung 4.3.: Messmethode für das Vorbeifahrtgeräusch eines Flugzeug-TaxiBot-Gespans (DT). [Eigene Darstellung]

4.2.1.2 Messmethode zur quantitativen Beurteilung des Standgeräusches (Messmethode 2)

Mit der Messmethode für stehende Schallquellen kann sowohl der TaxiBot als auch der Vergleichsschlepper mit im Leerlauf laufendem Motor vermessen und bewertet werden. Die Anwendungsfälle, die hier zu Grunde liegen, sind das Warten der Schlepper auf den nächsten Auftrag oder auf die Freigabe zum Ankoppeln des Flugzeugs vor dem Pushback. Beim TaxiBot kommt das Warten auf die Freigabe zur Abfahrt nach dem Entkoppeln des Flugzeugs auf der Abkoppelposition hinzu.

Die Messmethode ist DIN ISO 3744 [59] zur Bestimmung der Schallleistung von Geräuschquellen entlehnt. Diese erfordert jedoch Messungen entlang einer dreidimensionalen Hüllfläche um die Schallquelle herum und kann in der exakten Form am Flughafen nicht umgesetzt werden. Stattdessen wird eine Abwandlung der Methode vorgenommen: Die Messpositionen werden in einer zweidimensionalen, lateralen Anordnung um den Schlepper verteilt. Abbildung 4.4 zeigt die Anordnung der Messpositionen am Beispiel des TaxiBots.

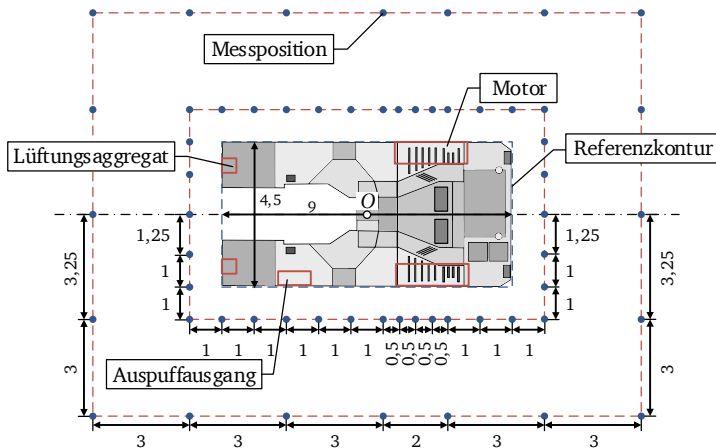


Abbildung 4.4.: Messmethode zur Ermittlung des TaxiBot-Standgeräusches. Der Motor läuft dabei im Leerlauf. Maße in m. [Eigene Darstellung]

Wie bei der Messmethode für Vorbeifahrten wird auch hier zunächst eine Referenzkontur um den Schlepper definiert. Diese hat in der Länge und Breite die Abmessungen des jeweiligen Schleppers. Die Messpositionen sind in derselben Ebene rechteckig angeordnet und befinden sich in einem Abstand von 1 m bzw.

4 m von der Referenzkontur. Dabei entspricht die 1 m-Entfernung den Empfehlungen der Normen DIN ISO 3744 [59] und DIN EN ISO 3746 [60]. Der Abstand von vier Metern wird ergänzend gewählt, um mit dem Messaufbau die Abnahme des Schalldruckpegels über die vierfache Entfernung ermitteln zu können. Die einzelnen Messpunkte sind so gewählt, dass an den Positionen, die den vermuteten Hauptschallquellen (Motor, Auspuffausgang) am nächsten liegen, die Messabstände kleiner sind. In größerer Entfernung sind die Schalldruckpegeldifferenzen geringer und erlauben einen größeren Abstand zwischen den Messpunkten. Da der TaxiBot bezüglich seiner Längsachse symmetrisch aufgebaut ist, sind auch die Messpositionen symmetrisch zur Längsachse angeordnet. Insgesamt sind es 58 Messpositionen. Das Mikrofon befindet sich $(1,2 \pm 0,02)$ m über dem Boden und die Bezugsachse ist so ausgerichtet, dass sie senkrecht auf die Messfläche (gedachter Bezugsquader um den Schlepper) zeigt. Am Eckpunkt zeigt die Bezugsachse auf den Ursprungspunkt O des Bezugsquaders, der in der Grundebene liegt [59, S. 22]. Die einzelnen Messpositionen werden nacheinander mit demselben Mikrofon vermessen.

Da sich der Vergleichsschlepper hinsichtlich der Anordnung seiner Aggregate vom TaxiBot unterscheidet, müssen die Messpositionen für dessen Vermessung angepasst werden (siehe Abbildung 4.5). Im Vergleich zum TaxiBot besitzt der AST-2 nur ein Motoraggregat, das sich in der Mitte des Schleppers hinter dem Fahrersitz befindet. Der Auspuffausgang ist auf der rechten Seite im Heck angeordnet. Hier werden die Messpositionen näher aneinander gelegt. Auf der linken Seite bleiben die Messabstände konstant. Der Vergleichsschlepper wird an 50 Messpositionen vermessen.

4.2.2 Messequipment und Messaufbau

Entsprechend den im Abschnitt 4.1 ermittelten Anforderungen an die Messausrüstung wurden unter Berücksichtigung des zur Verfügung stehenden Budgets Messgeräte und zugehöriges Equipment ausgewählt und beschafft. Die einzelnen Bestandteile der Messausrüstung werden nachfolgend erläutert.

Zum Messequipment gehört ein Freifeld-Mikrofon von Microtech Gefell der nach DIN EN 61672-1 [22] definierten Genauigkeitsklasse 1. Dabei setzt sich das System Messmikrofon aus einer $\frac{1}{2}$ “-Kondensator-Mikrofonkapsel (MK 255) mit Dauerpolarisation, einem Vorverstärker (MV 210) und einer Mikrofonhalterung mit $\frac{1}{2}$ “-Schelle (MH 64) zusammen. Die Mikrofonkapsel deckt einen Frequenzbereich von 3,5 Hz bis 20 kHz ab und weist einen Grenzschalldruckpegel von 146 dB auf [61]. Der Vorverstärker kann über ein BNC-Kabel an den Messrechner angeschlossen werden und verfügt über einen eingebauten Speicher zur Mikrofonidentifizie-

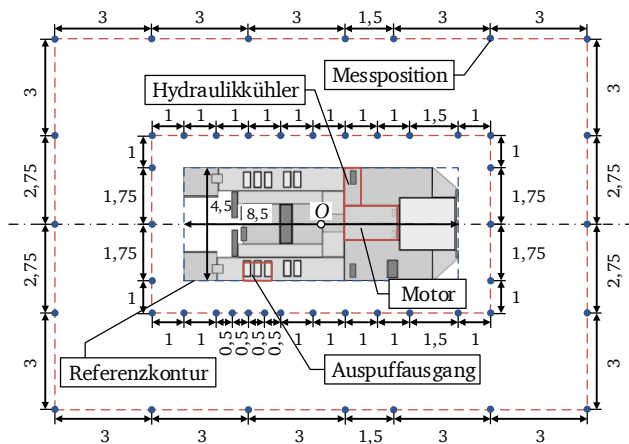


Abbildung 4.5.: Messmethode zur Ermittlung des Vergleichsschlepper-Standgeräusches (Goldhofer AST-2). Der Motor läuft dabei im Leerlauf. Maße in m. [Eigene Darstellung]

rung, mit dem Mikrofondaten eingeschrieben und gelesen werden können (TEDS) [62]. Dies erleichtert den Einsatz des Mikrofans, da es beim Anschließen an den Messrechner direkt erkannt wird. Um die Beeinflussung der Messwerte durch Strömungsgeräusche möglichst niedrig zu halten, wird ein Windschirm verwendet.

Zur Kalibrierung des Mikrofansystems wird ein akustischer Handkalibrator des Typs CAL200 von Larson Davis verwendet. Dieser liefert einen Ausgangspegel von 94 dB oder 114 dB bei einer Frequenz von 1.000 Hz. Der Kalibrator genügt den Anforderungen der Leistungsklasse 1 (nach DIN EN IEC 60942 [63]) und lässt sich durch einen Knopfdruck bedienen [64].

Das Kernstück des Messsystems bildet das Soundbook_MK2_4B von SINUS Messtechnik. Es basiert auf der Hardware APOLLO, ebenfalls von SINUS Messtechnik, die einem portablen PC Toughbook CF-19 von Panasonic untergebaut ist. Ein vielseitiger Einsatz bietet sich durch das staub- und spritzwassergeschützte Magnesiumgehäuse. Das Soundbook verfügt über 4 BNC- und eine Trigger-Buchse sowie diverse weitere Kanäle, die beispielsweise genutzt werden können, um eine Wetterstation anzuschließen. Mithilfe der Software SAMURAI werden Signale in Echtzeit verarbeitet und visualisiert. Dabei enthält die Software folgende virtuelle Messinstrumente: Schallpegelmesser, Terz-/Oktavanalysator, FFT-Analysator und Messung des Zeitsignals. Mit der Option Post-Processing lässt sich eine Neuanalyse gespei-

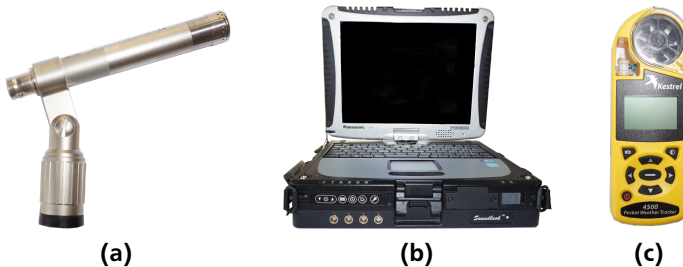


Abbildung 4.6.: Messequipment: (a) Messmikrofon von Microtech Gefell, (b) Soundbook von Sinus Messtechnik, (c) Wetterstation von Nielsen-Kellermann. [Eigene Fotografien]

cherter Zeitdaten vornehmen. Der Hersteller gibt eine Akkulaufzeit von 4 Stunden¹ an. [65]

Für die Protokollierung und Bewertung der Umgebungsbedingungen wurde die Wetterstation Kestrel 4500 von Nielsen-Kellermann ausgewählt und um eine Wetterfahne erweitert. Damit können alle relevanten meteorologischen Parameter während der Messkampagne aufgenommen und zur späteren Auswertung per USB-Schnittstelle auf den PC übertragen werden [66]. Abbildung 4.6 zeigt das für die Messungen verwendete Mikrofon, den Messrechner sowie die Wetterstation.

Zur Auslösung der nach Messmethode 1 vorgesehenen Vorbeifahrten dient ein System aus Lichtschranken. Da bei Laserlichtschranken die Gefahr der Blendung durch den Lichtpunkt direkt oder durch Reflexionen besteht, wird für die Durchführung der Messungen auf ein Infrarotsystem zurückgegriffen. Der schematische Aufbau der Messkette ist in Abbildung 4.7 dargestellt.

Das Lichtschrankensystem besteht aus jeweils zwei Sender- (Typ LSS 96M-1350-26) und Empfängereinheiten (Typ LSE 96M/R-3310-25) von Leuze electronic. Die Betriebsreichweite des Systems ist mit maximal 120 m für den Einsatzzweck ausreichend [67]. Um einen mobilen, flexiblen und ausreichend langen Einsatz zu gewährleisten, wird eine Stromversorgung der Sendereinheit durch Lithium-Polymer(LiPo)-Akkus (2.400 mAh, 4 Zellen/14,8 V) realisiert. Die Lichtschranken werden über eigens dafür gefertigte Adapterplatten auf Stative montiert und sind zusätzlich mit einem Schirm ausgestattet, der den Einfluss von Fremdlicht reduziert sowie vor Niederschlag schützt (siehe Abbildung 4.8). Das Signal der beiden

¹ Während der Messungen wurde festgestellt, dass insbesondere bei Nutzung des Energiesparmodus Akkulaufzeiten von bis zu 6 Stunden möglich sind.

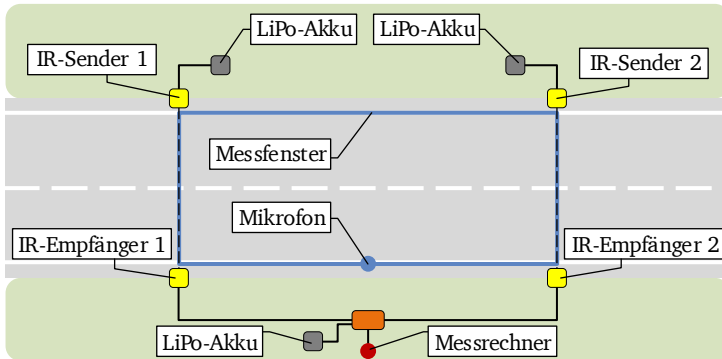


Abbildung 4.7.: Aufbau der Messkette zur Beurteilung des Vorbeifahrtgeräusches nach Messmethode 1. [Eigene Darstellung]

Lichtschraken-Empfangeinheiten wird über zwei je 70 m lange Gummischlauchleitungen (H07RN-F 4G 1,5) mit 4 Adern und einem Nennquerschnitt von $1,5 \text{ mm}^2$ an eine Verteilerbox übertragen, die in Abbildung 4.9 gezeigt ist. In der Verteilerbox ist auch die Stromversorgung für die Empfänger untergebracht. Die Verteilerbox ist wiederum über eine Lemo-Steckverbindung an das Soundbook angeschlossen. Durch das Trigger-System können Schallmessungen beim Betreten und Verlassen eines abgesteckten Prüfabschnitts eindeutig initialisiert und beendet werden. Des Weiteren ermöglicht dies eine indirekte Ermittlung der Vorbeifahrtgeschwindigkeit.

4.2.3 Vortests

Eine Durchführung von Vortests ist erforderlich, um erste Richtwerte für Schalldruckpegel zu ermitteln, Umgebungsbedingungen für Messungen am Tag zu bestimmen und um die Messmethoden auf ihre Stärken und Schwächen zu prüfen und weiterzuentwickeln.

Eine einfache Möglichkeit, die akustischen Messungen durchzuführen, wäre die Nutzung des Lufthansa Technik (LHT) Geländes am Flughafen Frankfurt. Hierfür ist kein Vorfeldausweis erforderlich und die Messungen könnten ohne größere Vorplanungen vorgenommen werden. Testmessungen belegten jedoch, dass das Gelände aufgrund des hohen Umgebungsgeräuschpegels für akustische Messungen nicht geeignet ist. Generell sind Messungen am Tag auf dem gesamten Flughafen-gelände angesichts der hohen Geräuschpegel des Vorfeldverkehrs, der startenden und landenden Flugzeuge sowie der Triebwerkprobeläufe nicht sinnvoll. Daher sollen die Messungen bei Nacht unter Ausnutzung des Nachtflugverbots stattfinden.

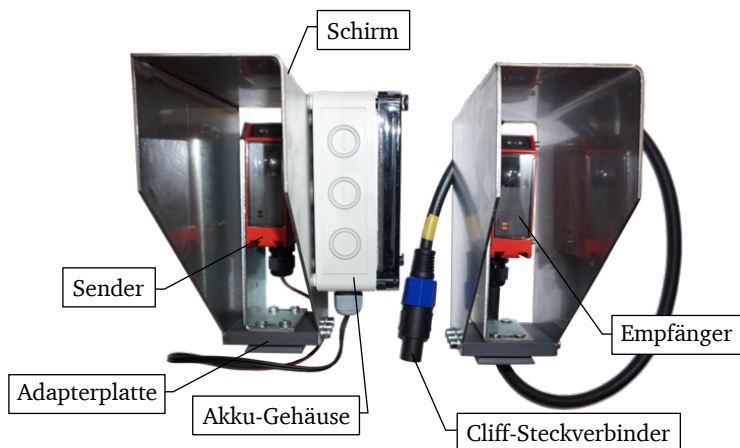


Abbildung 4.8.: Infrarot-Lichtschrankensystem von Leuze electronic. Links: Sender-einheit mit Adapterplatte, Schirm und Gehäuse zur Unterbringung eines Lithium-Polymer-Akkus. Rechts: Empfängereinheit mit Adapterplatte, Schirm und 4-poliger Cliff-Steckverbindung. [Eigene Fotografie und Darstellung]

Zudem erfordert die Messmethode für Vorbeifahrtgeräusche eine ausreichend lange Strecke, die ein Wenden, Beschleunigen und Abbremsen der jeweiligen Vorbeifahrtkonfiguration erlaubt. Für das Vermessen der Vorbeifahrten eines Flugzeugs bzw. Flugzeug-TaxiBot-Gespans muss insbesondere ein Rollweg oder eine Start-/Landebahn verfügbar sein.

Beim ersten Vortest² in der Nacht vom 12. auf den 13. Juni 2013 wurde die Wichtigkeit von schneller und eindeutiger Kommunikation festgestellt. Sowohl der Pilot als auch der Schlepperfahrer müssen anhand eindeutiger Signale und Freigaben informiert werden, wann die Messung beginnt und sie losfahren können. Aber auch die Notwendigkeit eines Triggers zum Auslösen der Messungen wurde deutlich. Zunächst wurden die Messungen dann gestartet und gestoppt, wenn eine Person am Anfang bzw. Ende des Messfensters ein Lichtzeichen gegeben hat.

² Der erste Vortest entspricht auch der ersten Messnacht (vgl. Unterabschnitt 4.2.5), obwohl das in Unterabschnitt 4.2.2 vorgestellte Messequipment noch nicht zur Verfügung stand. Hier wurden die Schalldruckpegel des Vorbeifahrt- und Standgeräusches des Vergleichsschleppers aufgenommen. Diese Messungen wurden aus Zeit- und Kostengründen später nicht erneut durchgeführt.

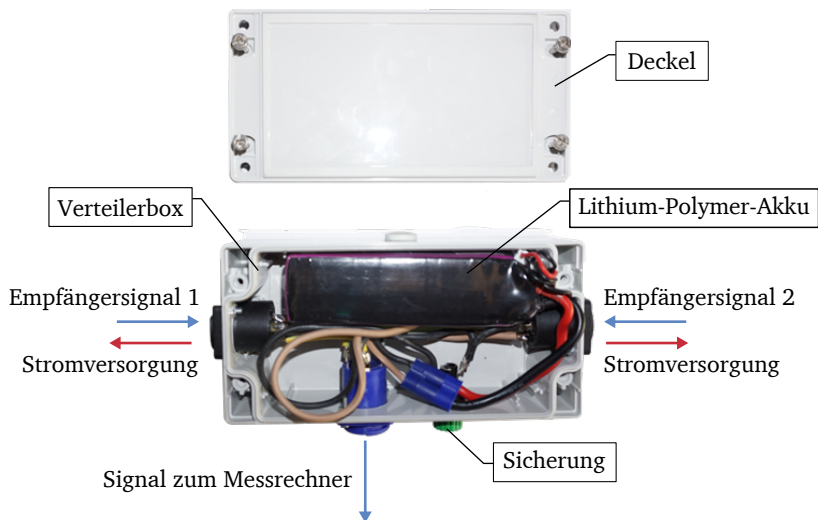


Abbildung 4.9.: Verteilerbox zur Weiterleitung der Lichtschranken-Empfängersignale an den Messrechner. [Eigene Fotografie und Darstellung]

Da dies zu hohen Ungenauigkeiten und mitunter zu Missverständnissen führte, wurden Laserlichtschranken in die Messkette integriert.

Bei den Vortests wurden darüber hinaus verschiedene Messsysteme ausprobiert. Zum einen wurde ein Handschallpegelmesser (HSPM) der Firma Brüel & Kjær (Typ 2250) getestet, zum anderen eine Messkette mit zwei Messmikrofonen (ROGA Instruments, MI-17) und einem Messrechner mit externer Audio-Messkarte (RogaDAQ2)³ aufgebaut. Die Entscheidung fiel jedoch aufgrund der ermittelten Anforderungen auf das Soundbook der Firma SINUS Messtechnik (vgl. Anhang B.1, Anforderungen 1.6.1. bis 1.6.11.).

Vortest am 15. Januar 2014

Die Messnacht vom 15. Januar 2014 war zunächst als Teil der Messkampagne geplant, konnte aber aufgrund des zur Verfügung stehenden Standortes und widriger Wetterbedingungen nur dazu genutzt werden, qualitative Aussagen zu treffen und die Messmethode zu verbessern.

³ Das Messequipment von ROGA Instruments konnte freundlicherweise vom Fachgebiet Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik (SzM) der TU Darmstadt entliehen werden.

Da die Messungen im Rahmen der Boeing Zertifizierungstests für den TaxiBot durchgeführt wurden, musste der Messort an eine bereits geplante Testroute angepasst werden. Damit wurden die Zertifizierungstests möglichst wenig beeinflusst und dennoch genügend Vorbeifahrten am Mikrofon gewährleistet. Der Messbereich befand sich vor dem Gebäude 451 am Rollweg November. Abbildung 4.10 zeigt die Lage des Messbereiches.

Vermessen wurden Vorbeifahrten folgender Testkonfigurationen in den Fahrtrichtungen Links > Rechts und Rechts > Links:

- AETO B737-500
- DT (TW aus, APU an)
- TaxiBot einzeln
- Single-Engine Taxiing (Rollvorgang B737-500 mit nur einem Triebwerk)

Die Ergebnisse der Messungen zeigen, dass nachts ein Pegelabstand von Fremd- zu Nutzsignal von mindestens 15 dB erreicht wird. Damit werden die zu messenden Schalldruckpegel in vernachlässigbarer Höhe vom Hintergrundgeräusch beeinflusst und es muss keine Fremdgeräuschkorrektur vorgenommen werden. Zudem konnte mithilfe der Messungen gezeigt werden, dass die Länge des Messfensters ausreicht, um eine Zeitspanne zu umfassen, während der der Schalldruckpegel höchstens 10 dB unter dem höchsten Schalldruckpegel liegt (vgl. Anhang B.1, Anforderung 2.6.).

Ein Vergleich des AETO und Single-Engine Taxiings zeigt, dass für den gemessenen Schalldruckpegel das dem Messmikrofon zugewandte Triebwerk maßgeblich ist. Ist beim Single-Engine Taxiing das dem Mikrofon zugewandte Triebwerk in Betrieb, so ergeben sich keine deutlich messbaren Unterschiede zum Flugzeug, das mit dem Schub beider Triebwerke rollt. Läuft allerdings das vom Mikrofon abgewandte Triebwerk, so lässt sich eine Pegeldifferenz des Maximalschalldruckpegels $L_{p,A,E,max}$ von ca. 11 – 12 dB(A) und des äquivalenten Dauerschallpegels $L_{p,A,eq}$ von ca. 6 dB(A) messen. Der direkte Vergleich von AETO und DT zeigt, dass beim DT eine Reduzierung des Maximalschalldruckpegels von ca. 15 dB(A) und des äquivalenten Dauerschallpegels von ca. 10 – 11 dB(A) zu erwarten ist.

4.2.4 Planung der Messkampagne

Da die Messungen möglichst unbeeinflusst von Fremdgeräuschen sein müssen und der laufende Betrieb am Flughafen weder beeinflusst noch gestört werden darf

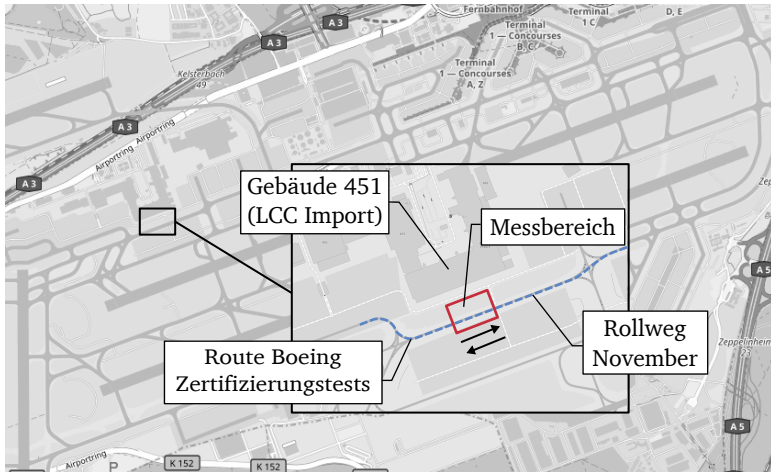


Abbildung 4.10.: Position des Messbereiches zur Evaluierung des TaxiBots im Rahmen der Boeing Zertifizierungstests am 15. Januar 2014 (Vor-test). [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

(vgl. Anhang B.1, Anforderungen 3.6. und 5.1.), soll die Messkampagne während des Nachtflugverbots durchgeführt werden. Damit kann sichergestellt werden, dass während der Messungen ein ausreichender Abstand zwischen Fremdgeräusch (Hintergrundgeräuschpegel) und zu messender Schallquelle von mindestens 10 dB(A) eingehalten wird und keine Beeinträchtigung des Betriebs am Flughafen Frankfurt stattfindet. Dies wurde in nächtlichen Vortests untersucht und bestätigt (vgl. Unterabschnitt 4.2.3).

Eine weitere Anforderung schreibt vor, dass keine schallreflektierenden Objekte in der Nähe der Prüfstrecke vorhanden sein dürfen, um weitestgehend Freifeldbedingungen sicherzustellen (vgl. Anhang B.1, Anforderung 3.3.). Dies wird berücksichtigt, indem der Ort für die Messungen an das südliche Ende der Startbahn 18 gelegt wird. Der Messbereich befindet sich damit in etwa 2,5 km Entfernung vom nächsten größeren Gebäude, der A380-Halle. Dementsprechend können auch Fremdgeräusche aus dem Norden des Flughafens nur stark gedämpft zum Messbereich vordringen. Die Gegebenheiten vor Ort und die Lage des Messbereiches sind in Abbildung 4.11 dargestellt.

Die Vorgehensweise beim Aufbau des Messequipments wurde detailliert geplant und mit allen Beteiligten im Vorfeld besprochen. Da während des Nachtflugverbots

nur wenig Zeit für die Messungen zur Verfügung steht, muss der Aufbau möglichst schnell erfolgen. Um sicherzustellen, dass nichts vergessen wird, wurde eine detaillierte Mitnahmeliste erstellt (siehe Anhang B.2, Tabelle B.2). Diese erleichtert dem Flughafenpersonal die Sicherheitsüberprüfung vor dem Betreten des Flughafengeländes. Zudem gibt es einen zeitlichen Ablaufplan, der als Rahmen für die Messkampagne dient (siehe Anhang B.3, Tabelle B.3).

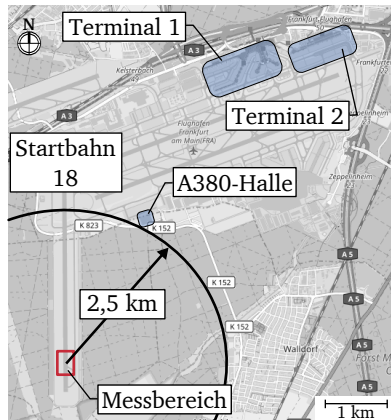


Abbildung 4.11.: Position des Messbereiches und Entfernung zum nächsten größten Gebäude. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

4.2.5 Durchführung der Messkampagne

Die Messkampagne erfolgte mithilfe der in Unterabschnitt 4.2.1 vorgestellten Messmethoden für Vorbeifahrt- und Standgeräusche. Einige Eindrücke der Messkampagne zeigt Abbildung 4.12. Insgesamt wurden in zwei voneinander unabhängigen Messnächten Daten erhoben (12./13. Juni 2013 und 15./16. Mai 2014). Die Erfahrungen der ersten Messnacht flossen in die Weiterentwicklung des Messaufbaus und -equipments für die zweite Messnacht ein. So stand z. B. in der ersten Messnacht das in Unterabschnitt 4.2.2 vorgestellte Messequipment noch nicht zur Verfügung. Die Messgrößen wurden stattdessen von einem Handschallpegelmesser von Brüel & Kjær (Typ 2250) aufgezeichnet. Dieser hat, wie das Soundbook, ebenfalls die Genauigkeitsklasse 1 und verfügt über ein $\frac{1}{2}$ “-Mikrofon. Da auch die Lichtschranken noch nicht vorhanden waren, wurden die Messungen manuell ausgelöst und beendet, wenn das Messfenster durchfahren wurde.

In der ersten Messnacht stand auch der TaxiBot noch nicht zur Verfügung. Daher wurde zunächst nur der Vergleichsschlepper vom Typ Goldhofer AST-2 in unterschiedlichen Konfigurationen vermessen: Vorbeifahrt des Flugzeug-Schlepper-Gespanss, Vorbeifahrt des einzelnen Schleppers sowie Schlepper im Stand. Zudem wurden die Vorbeifahrtpegel einer mit Triebwerkschub rollenden B737-500 gemessen. Für die Auswertungen werden jedoch nur die Messwerte der Einzelvorbeifahrten des Vergleichsschleppers sowie die des stehenden Schleppers weiterverwendet. Alle anderen Messungen konnten mit dem weiterentwickelten Messaufbau und dem in Unterabschnitt 4.2.2 vorgestellten Messequipment wiederholt werden. Abweichend von Messmethode 1, wurden die Messwerte der Einzelvorbeifahrten des Vergleichsschleppers in der ersten Messnacht in einer Entfernung von 7,5 m erfasst. Um die gemessenen Geräuschpegel mit denen des TaxiBots vergleichen zu können, werden die Messwerte auf eine Messentfernung von 22,5 m umgerechnet (vgl. Unterabschnitt 4.2.6).



Abbildung 4.12.: Eindrücke der Messkampagne vom 12./13. Juni 2013 und 15./16. Mai 2014. [Eigene Fotografien]

Für die Einweisung des an der Messkampagne beteiligten Piloten und Schleppers wurden Briefing-Unterlagen erstellt und vor den Messungen durchgesprochen. Es wurden Instruktionen erteilt, das Messfenster auf der Mittellinie zu durchfahren und dabei eine konstante Geschwindigkeit einzuhalten. Die Rollgeschwindigkeit des Flugzeugs sollte zwischen 17 und 22 Knoten liegen und damit typische Geschwindigkeiten am Flughafen Frankfurt repräsentieren. Nach dem Durchfahren des Messfensters soll der Pilot bzw. Schlepperfahrer wenden und das Messfenster in entgegengesetzter Richtung passieren.

Die Anzahl der Vorbeifahrten einer Konfiguration legt DIN ISO 362-1 [68] folgendermaßen fest: Für alle Konfigurationen sind je Fahrzeugseite jeweils mindestens vier Messwerte zu erfassen. Da während der nächtlichen Messkampagnen der limitierende Faktor die Zeit war, erfolgte die Festlegung der Anzahl der Vorbeifahrten in enger Abstimmung mit der Fraport AG und Lufthansa LEOS. In der Regel konnten vier Vorbeifahrten je Konfiguration vermessen werden (zwei Vorbeifahrten je Fahrzeugseite). Zusätzlich musste Zeit eingeplant werden, um die Vermessung der Schlepper im Stand vorzubereiten und durchzuführen. Für das Aufzeichnen der Messraster auf dem Boden, das Positionieren der Schlepper und das Erfassen der Schalldruckpegel auf jeder Messposition wurden je Schlepper 1,5 Stunden eingeplant und benötigt. Die während der Messungen geführten schriftlichen Protokolle sind Anhang B.4, Tabelle B.4 und Tabelle B.5, zu entnehmen.

4.2.6 Datenaufbereitung

Wie in Unterabschnitt 4.2.5 erwähnt, betrug die Messentfernung in der ersten Messnacht zum vorbeifahrenden Vergleichsschlepper 7,5 m. Um die Messwerte mit denen aus der zweiten Messnacht vergleichen zu können, müssen diese auf eine Entfernung von 22,5 m umgerechnet werden. Hierfür wird angenommen, dass es sich bei dem Schlepper um eine Punktschallquelle mit kugelförmiger Schallausbreitung handelt. Die geometrische Dämpfung hat an der Reduzierung des Schalldruckpegels den größten Anteil. Die Luftabsorption, Bodendämpfung und meteorologischen Einflüsse werden aufgrund der geringen Messentfernung vernachlässigt. Die Umrechnung erfolgt nach Gleichung 4.1, wobei für die Entfernung $r_2 = 22,5$ m und für die Entfernung $r_1 = 7,5$ m eingesetzt wird:

$$L_{p2} = L_{p1} - 10 \cdot \lg \left(\frac{r_2}{r_1} \right)^2 \text{ dB} \quad (4.1)$$

Der Schalldruckpegel L_{p1} ist dementsprechend der in 7,5 m gemessene Pegel und L_{p2} der für eine Entfernung von 22,5 m berechnete Schalldruckpegel. Um den

Schalldruckpegel in 22,5 m zu ermitteln, muss also von den in 7,5 m Entfernung gemessenen Pegeln ein Pegel von 9,5 dB abgezogen werden.

4.3 Messergebnisse

Dieser Abschnitt stellt die Ergebnisse der akustischen Messkampagne vor. Zunächst werden die bei den Messungen erhobenen meteorologischen Daten präsentiert. Anschließend folgen die mit den beiden Messmethoden erhobenen Ergebnisse.

4.3.1 Meteorologische Daten

Während der Messungen wurden Wetterdaten erhoben, um zu gewährleisten, dass die meteorologischen Parameter innerhalb der normativ vorgegebenen Grenzen liegen (vgl. Anhang B.1) und die akustischen Messwerte verwendet werden können.

In der ersten Messnacht (12./13. Juni 2013) war die Kestrel Wetterstation noch nicht Teil der Messausstattung (vgl. Unterabschnitt 4.2.2). Stattdessen wurden die Wetterdaten (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Windrichtung) vom Deutschen Wetterdienst abgefragt, der am Flughafen Frankfurt eine Messstation betreibt. Weiterhin wurde die Windgeschwindigkeit in der Nähe des Messmikrofons mittels eines Flügelrad-Anemometers erfasst (Modell Windmaster 2 der Firma Kaindl). Im Verlauf der Messnacht sank die Lufttemperatur von 14,5 °C auf 13,7 °C. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug 83 % bis 89 % und die Windgeschwindigkeit maximal 2,6 m/s bei Windrichtungen zwischen 180° und 220°.

Während der zweiten Messnacht (15./16. Mai 2014) wurden die Wetterdaten mit der Kestrel Wetterstation aufgezeichnet. Das Speichern der Daten erfolgte in Abständen von fünf Minuten. Eine graphische Darstellung der Windgeschwindigkeit, Windrichtung, Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit zeigt Abbildung 4.13. Wie in Abbildung 4.13 zu sehen, wurde in den ersten 25 Minuten nach Beginn der Messungen eine Windgeschwindigkeit von 0 m/s aufgezeichnet. Grund hierfür ist ein verspätetes Öffnen der Anemometerabdeckung. Dies hat jedoch keine Auswirkung auf die anderen Messgrößen. In der Messnacht wurde eine maximale Windgeschwindigkeit von 5,4 m/s gemessen, dabei wehte der Wind aus Norden (3° bis 34°). Die Temperatur sank im Nachtverlauf von 11,6 °C auf 10 °C leicht ab und die relative Luftfeuchtigkeit stieg von 72,7 % auf 82,7 %.

4.3.2 Vorbeifahrtgeräusch

Bei den Messungen wurden verschiedene Messgrößen erfasst (vgl. Unterabschnitt 2.6.2): Unter anderem der A- und F-bewertete Maximalschallpegel $L_{p,A,F,max}$,

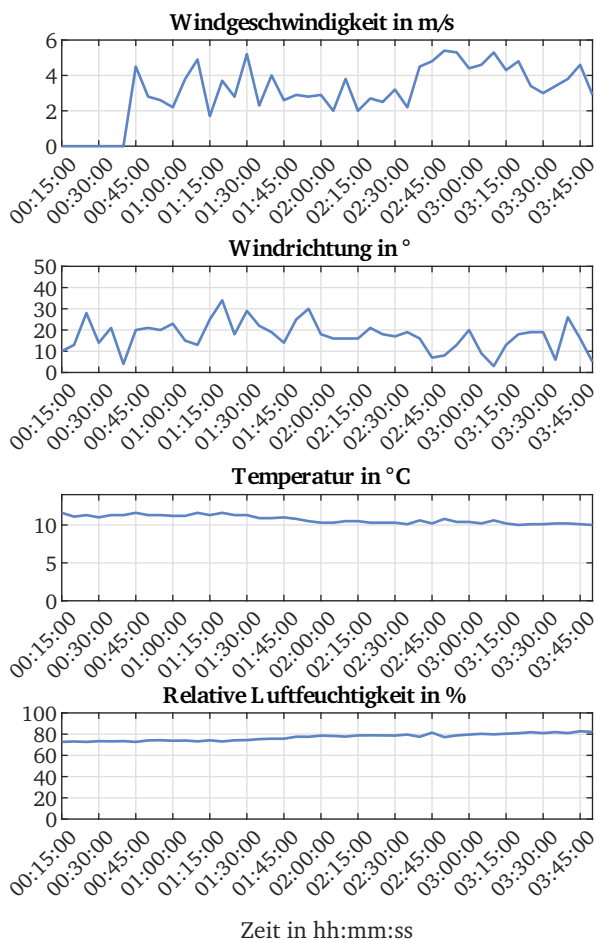


Abbildung 4.13.: Aufzeichnung der meteorologischen Daten während der Messnacht vom 15./16. Mai 2014.

der A-bewertete energieäquivalente Dauerschallpegel $L_{p,A,eq}$ und der A-bewertete Schallexpositionspegel $L_{p,A,E}$, der für eine Vergleichbarkeit von Vorbeifahrten mit variierender Geschwindigkeit sorgt.

Die Messergebnisse für die Vorbeifahrten der fünf Konfigurationen sind in Abbildung 4.14 dargestellt. Das Diagramm zeigt den Schalldruckmittlungspegel $L_{x;m}$

der drei Messgrößen und das jeweils zugehörige Konfidenzintervall mit einem Konfidenzniveau von 0,8 (berechnet nach VDI 3723 [69]). Die einzelnen Berechnungsschritte sowie die berechneten Größen sind im Anhang B.5 dargestellt. Für die Vorbeifahrtkonfiguration „AETO B737-500“ wurde ein $L_{p,A,E}$ -Wert von 105,1 dB(A) sowie ein $L_{p,A,F,max}$ -Wert von 102,9 dB(A) und ein $L_{p,A,eq}$ -Wert von 94,0 dB(A) gemessen. Die Schalldruckpegel der Konfiguration „DT (TW aus, APU an)“ sind hingegen niedriger und erreichen folgende Werte: $L_{p,A,E} = 92,4$ dB(A), $L_{p,A,F,max} = 86,3$ dB(A) und $L_{p,A,eq} = 80,8$ dB(A). Die beim DT mit laufenden Triebwerken und laufender APU gemessenen Schalldruckpegel weisen hingegen nur sehr geringe Unterschiede im Vergleich zu den Pegeln beim Rollen mit Triebwerkschub auf. Die Vorbeifahrtpegel der Schlepper ohne Flugzeug liegen deutlich unterhalb der Pegel, die beim AETO oder DT erreicht werden. Beim Vergleichsschlepper werden für eine Entfernung von 22,5 m Pegel von 79,7 dB(A) ($L_{p,A,E}$), 73,5 dB(A) ($L_{p,A,F,max}$) und 67,4 dB(A) ($L_{p,A,eq}$) berechnet (gemessene Pegel sind Anhang B.6 zu entnehmen). Die beim TaxiBot gemessenen Pegel liegen für dieselbe Entfernung mit 78,0 dB(A) ($L_{p,A,E}$), 71,2 dB(A) ($L_{p,A,F,max}$) und 67,0 dB(A) ($L_{p,A,eq}$) etwas darunter.

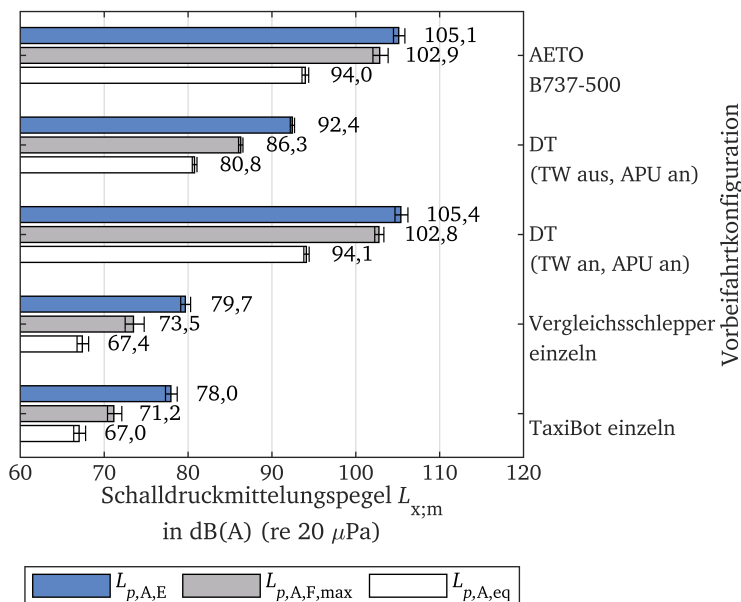


Abbildung 4.14.: Akustische Messung des Vorbeifahrtgeräusches. Messergebnisse der fünf untersuchten Testkonfigurationen.

Abbildung 4.15 zeigt den Zeitverlauf des Kurzzeit- $L_{p,A,eq}$ mit einer Mittelungsdauer von 5 ms ($L_{p,A,eq,\Delta t=5\text{ ms}}$) für zwei exemplarische Vorbeifahrtmessungen. Zur besseren Erkennbarkeit wurden beide Verläufe geglättet. Diese sind charakteristisch für eine mittels Triebwerkschub rollende B737-500 und dasselbe Flugzeug, das vom TaxiBot gezogen wird (TW aus, APU an). Die Dauer der beiden Vorbeifahrten ist unterschiedlich. Der Rollvorgang hat 14,09 s gedauert und das DT 14,64 s. Daher ist die Vorbeifahrtgeschwindigkeit des rollenden Flugzeugs geringfügig höher als die des Flugzeug-Schlepper-Gespans und damit die Position im Messfenster zu einem bestimmten Zeitpunkt nicht exakt gleich. Der maximale $L_{p,A,eq,\Delta t=5\text{ ms}}$ -Wert beträgt für das AETO 106,6 dB(A) und für das DT 89,3 dB(A). Das Maximum beider Verläufe ist gegeneinander verschoben. Der maximale Wert des rollenden Flugzeugs tritt zeitlich etwa in der Mitte des Messfensters auf, wohingegen das Maximum des vom TaxiBot gezogenen Flugzeugs etwa bei 2/3 des Zeitfensters auftritt. Beim AETO bleibt der Schalldruckpegel bis zu einer Messzeit von $t = 5,5\text{ s}$ in etwa konstant und steigt dann schnell an, bis das Maximum erreicht ist. Im Anschluss fällt der Schalldruckpegel konstant ab, bis das Flugzeug den Messbereich verlässt, und die Aufnahme der Messdaten automatisch gestoppt wird. Die Kurve des operationellen Schleppvorgangs hingegen steigt allmählich bis zu einer Zeit von etwa $t = 4\text{ s}$, dann verringert sich die Steigung der Kurve während das TaxiBot-Flugzeug-Gespann am Mikrofon vorbeifährt. Der maximale Wert wird bei $t = 11\text{ s}$ erreicht.

Des Weiteren wird die spektrale Zusammensetzung der Vorbeifahrtgeräusche untersucht. Abbildung 4.16 bis Abbildung 4.19 stellen die Frequenzspektren der Testkonfigurationen in Form eines Spektrogramms dar. Dabei ist der Zeitverlauf der Vorbeifahrt auf der Abszisse und die Frequenz auf der Ordinate aufgetragen. Die Amplituden (Schalldruckpegel) sind farbig gekennzeichnet.

Beim Rollvorgang des Flugzeugs sind die Triebwerke die Hauptschallquelle. In Abbildung 4.16 sind mehrere horizontale Linien erkennbar, die über die gesamte Messdauer bestehen. Aufgrund des Doppler-Effektes lässt sich eine Frequenzverschiebung zu niedrigeren Frequenzen erkennen, sobald die Schallquelle das Mikrofon passiert und sich entfernt. Die charakteristischen Frequenzen liegen am Anfang des Messfensters bei ca. 4.000 Hz, 4.700 Hz, 5.600 Hz und 6.300 Hz. Zudem gibt es zwei weitere Linien im oberen Frequenzbereich bei 10.700 Hz und 11.000 Hz. Hier tritt auch der maximale Schalldruckpegel von etwa 100 dB auf ($t = 6,1\text{ s}$), kurz nachdem die Triebwerk gondel das Mikrofon passiert hat. Weiterhin fällt ein Bereich zwischen 2.000 Hz und 4.000 Hz auf, der sich von $t = 0\text{ s}$ bis $t = 4\text{ s}$ erstreckt. Hier treten Schalldruckpegel von 70 dB bis 80 dB auf. Danach sinken die Schalldruckpegel auf etwa 60 dB bis 65 dB ab, bis sie zum Zeitpunkt $t = 5,3\text{ s}$ wieder ansteigen und sich kurzzeitig über einen breiten Frequenzbereich erstrecken, wenn

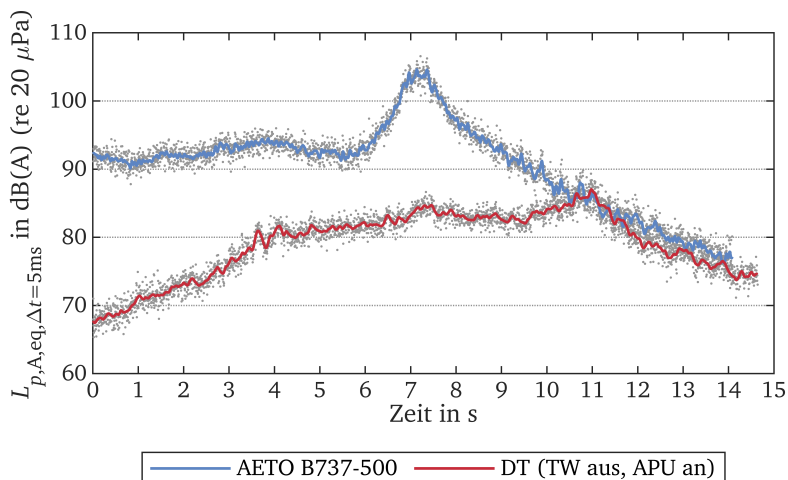


Abbildung 4.15.: $L_{p,A,eq,\Delta t=5ms}$ -Zeitverlauf zweier exemplarischer Vorbeifahrtmessungen (AETO B737-500 und DT (TW aus, APU an)).

das Flugzeug das Mikrofon passiert. Etwa parallel dazu ist ein Ansteigen und Abfallen der Frequenzen von ca. 1.000 Hz auf 1.800 Hz und wieder zurück auf 500 Hz erkennbar ($t = 5,9\text{ s}$ bis $t = 9\text{ s}$).

Das Spektrogramm der Konfiguration „DT (TW an, APU an)“ zeigt Abbildung 4.17. Obwohl bei dieser Konfiguration zusätzliche Schallquellen zum Frequenzspektrum und Schalldruckpegel beitragen, sieht das Spektrogramm Abbildung 4.16 sehr ähnlich und weist die gleichen Merkmale auf. Somit wird deutlich, dass weder TaxiBot noch APU sichtbar zum Frequenzspektrum beitragen und die Charakteristik der Triebwerke dominiert.

Abbildung 4.18 zeigt das Spektrogramm des DT, wie es als Alternative zum Rollen mittels Triebwerkschub vorgesehen ist (TW aus, APU an). Allgemein fällt auf, dass die Schalldruckpegel hier insgesamt deutlich niedriger ausfallen und sich in einem Bereich zwischen 40 dB und 80 dB bewegen. Im Frequenzbereich unter 125 Hz treten über die gesamte Messdauer bis zu 80 dB hohe Pegel auf. Des Weiteren gibt es drei charakteristische Frequenzlinien bei 7.000 Hz, 8.500 Hz und 10.000 Hz. Rund um 2.000 Hz und 4.000 Hz sind ca. 700 Hz breite Bänder zu erkennen, die sich über die gesamte Messdauer erstrecken. Im Zeitbereich von $t = 8,9\text{ s}$ bis $t = 12,2\text{ s}$, wenn die APU das Mikrofon passiert und sich entfernt, ist ein Hochlauf mit höheren Ordnungen sichtbar. Dieser erstreckt sich über den gesamten Frequenzbereich und ist akustisch deutlich wahrnehmbar.

Das Spektrogramm einer Einzelvorbeifahrt des TaxiBots zeigt Abbildung 4.19. Von allen Vorbeifahrtkonfigurationen sind hier die Vorbeifahrtpegel am niedrigsten. Im Bereich tiefer Frequenzen (unter 125 Hz) erreicht der Schalldruckpegel hier jedoch, wie beim DT, Werte von bis zu 80 dB. Deutlich erkennbar sind zwei Frequenzlinien bei 2.100 Hz und 2.300 Hz und ihre höheren Ordnungen. Zudem fallen Strukturschwingungen auf, die dafür sorgen, dass der Schalldruckpegel periodisch ansteigt und wieder absinkt. Für die Einzelvorbeifahrten des Vergleichsschleppers konnte keine Frequenzanalyse vorgenommen werden, da hier keine Zeitverläufe sondern lediglich die vom Handschallpegelmesser gemessenen Schalldruckpegel zur Verfügung standen.

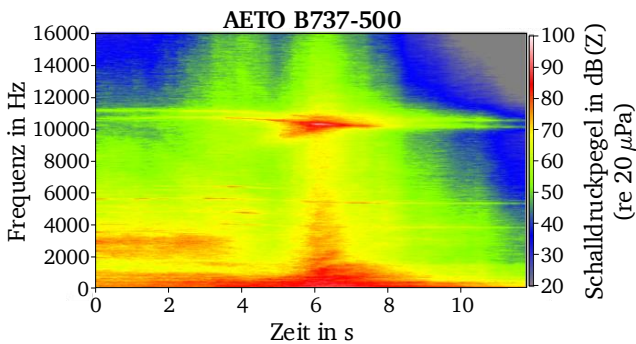


Abbildung 4.16.: Spektrogramm des AETO einer B737-500, Vorbeifahrtrichtung R > L bzgl. der Mikrofonposition (Vorbeifahrt Nr. 11).

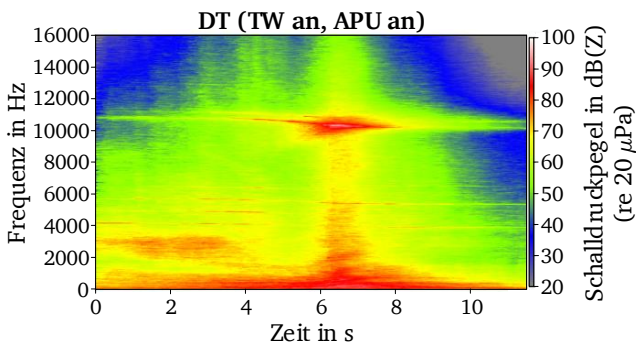


Abbildung 4.17.: Spektrogramm des DT (TW an, APU an), Vorbeifahrtrichtung R > L bzgl. der Mikrofonposition (Vorbeifahrt Nr. 3).

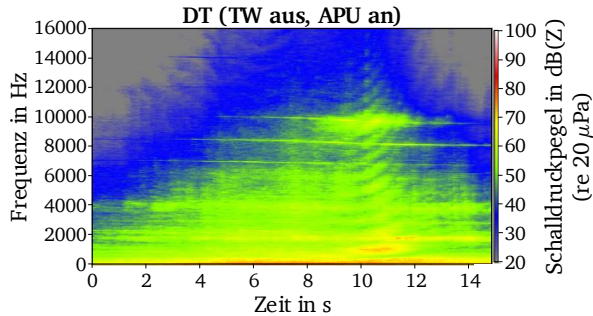


Abbildung 4.18.: Spektrogramm des DT (TW aus, APU an), Vorbeifahrtrichtung $R > L$ bzgl. der Mikrofonposition (Vorbeifahrt Nr. 7).

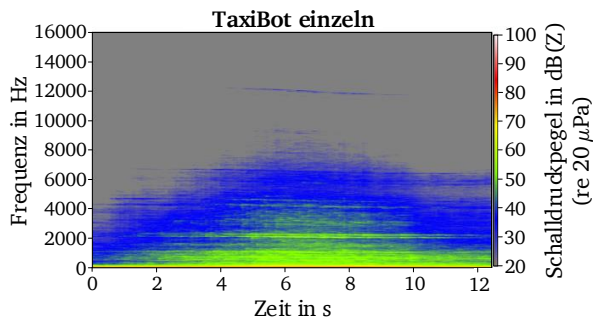


Abbildung 4.19.: Spektrogramm der Einzelvorbeifahrt des TaxiBots, Vorbeifahrtrichtung $L > R$ bzgl. der Mikrofonposition (Vorbeifahrt Nr. 18).

Um die Unterschiede in den Vorbeifahrtrichtungen zu untersuchen, werden für jede Vorbeifahrt Oktavschalldruckpegel O_n berechnet und über der jeweiligen Oktavmittenfrequenz (63 Hz, 125 Hz, 250 Hz, 500 Hz, 1.000 Hz, 2.000 Hz, 4.000 Hz und 8.000 Hz) dargestellt (siehe Abbildung 4.20 bis Abbildung 4.23). Die Oktavschalldruckpegel sind durch eine Trendlinie miteinander verbunden. Die Berechnung der Oktavschalldruckpegel erfolgt nach der Berechnungsvorschrift AzB (Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen). Das Vorgehen bei der Berechnung wird im Anhang B.7 detailliert dargelegt. Für Vorbeifahrtkonfigurationen, deren Hauptschallquelle das Triebwerk ist (AETO B737-500 und DT (TW an, APU an)), wird für die Berechnung, analog zur AzB, eine Bezugsentfernung von

$s_{On} = 300\text{ m}$ gewählt [17]. Für das DT (TW aus, APU an) sowie für die Einzelvorbeifahrten des TaxiBots beträgt $s_{On} = 1\text{ m}$.

Abbildung 4.20 (AETO B737-500) und Abbildung 4.21 (DT (TW an, APU an)) ähneln sich, wie auch schon die Spektrogramme der beiden Konfigurationen, qualitativ und quantitativ stark. Es lässt sich jedoch ein Unterschied in den Vorbeifahrtrichtungen $L > R$ und $R > L$ erkennen. Besonders deutlich ist dieser Unterschied in Abbildung 4.21 zu sehen. Bewegt sich das Flugzeug bzw. Flugzeug-Schlepper-Gespann von rechts nach links am Mikrofon vorbei, so treten insbesondere bei den Oktavmittelfrequenzen 500 Hz, 1.000 Hz und 2.000 Hz um 2 dB bis 5 dB niedrigere Pegel auf. Bei tieferen Frequenzen ist kein eindeutiger Unterschied erkennbar. Die Oktavschalldruckpegel der beiden Vorbeifahrtrichtungen ähneln sich beim AETO vor allem bei 125 Hz und beim DT (TW an, APU an) bei 250 Hz. Beim AETO liegt der höchste Pegel bei 71,0 dB (bei 500 Hz, Fahrtrichtung $L > R$) und der niedrigste Pegel bei 57,2 dB (bei 4.000 Hz, Fahrtrichtung $R > L$). Beim DT mit laufenden Triebwerken beträgt der höchste Pegel 72,3 dB (bei 500 Hz, Fahrtrichtung $L > R$) und der niedrigste Pegel 58,5 dB (bei 4.000 Hz, Fahrtrichtung $R > L$). Die Pegel erreichen hier ein leicht höheres Niveau, da neben den Triebwerken die APU und der TaxiBot zum Schalldruckpegel beitragen.

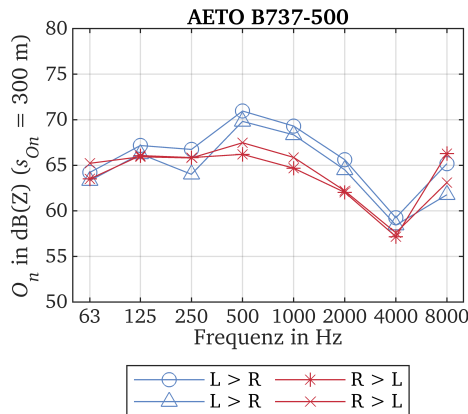


Abbildung 4.20.: Oktavschalldruckpegel O_n für die Konfiguration AETO B737-500 (Bezugsentfernung $s_{On} = 300\text{ m}$).

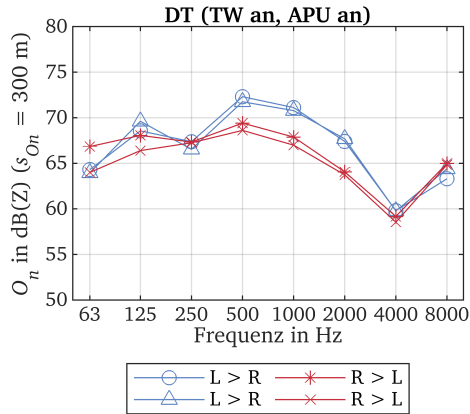


Abbildung 4.21.: Oktavschalldruckpegel O_n für die Konfiguration DT (TW an, APU an) (Bezugsentfernung $s_{On} = 300$ m).

Abbildung 4.22 und Abbildung 4.23 zeigen die beim DT (TW aus, APU an) und bei der Einzelvorbeifahrt des TaxiBots auftretenden Oktavschalldruckpegel für eine Bezugsentfernung von $s_{On} = 1$ m. Beim DT, bei dem die APU im Heck des Flugzeugs die Hauptschallquelle darstellt, tritt ein maximaler Oktavschalldruckpegel von 118,3 dB (bei 63 Hz, Fahrtrichtung $R > L$) und ein minimaler Pegel von 98,9 dB (bei 8.000 Hz, Fahrtrichtung $R > L$) auf. In Abbildung 4.23 fällt auf, dass bei der Vorbeifahrt des TaxiBots am Mikrofon, die erste Vorbeifahrt von links nach rechts (gekennzeichnet durch die Trendlinie mit dem Kreis-Marker) durchweg höhere Pegel aufweist als die anderen beiden Vorbeifahrten in dieser Richtung. Schon während der Testfahrten war ein deutlich lauterer Geräusch wahrnehmbar und wurde im Protokoll als Anomalie vermerkt (vgl. Anhang B.4, Tabelle B.5). Die Messung wird daher für die Berechnung des Schalldruckmittelungspegels verworfen. Auch bei diesen beiden Konfigurationen sind Unterschiede in den Vorbeifahrtrichtungen erkennbar. Die Fahrtrichtung $R > L$ weist beim DT für alle Mittenfrequenzen bis 4.000 Hz um bis zu 5,5 dB höhere Pegel auf. Bei 8.000 Hz hingegen ist der Pegel der Vorbeifahrt von rechts nach links um bis zu 8,0 dB niedriger als bei der Vorbeifahrt von links nach rechts. Bei einer Frequenz von 1.000 Hz sind die vier berechneten Oktavpegel nahezu identisch (Abweichung beträgt maximal 0,4 dB). Bei der Vorbeifahrt des TaxiBots ohne Flugzeug (siehe Abbildung 4.23) treten von rechts nach links bis einschließlich zu einer Frequenz von 1.000 Hz um 1,7 dB bis 10,3 dB höhere Pegel auf. Bei einer Frequenz von 2.000 Hz treffen sich alle Trendlinien in einem Punkt. Die Trendlinien der einzelnen Vorbeifahrtrichtungen liegen

nah beieinander und weisen nur geringe Unterschiede auf (0,2 dB bis 1,3 dB bei $L > R$, 0,3 dB bis 2,6 dB bei $R > L$).

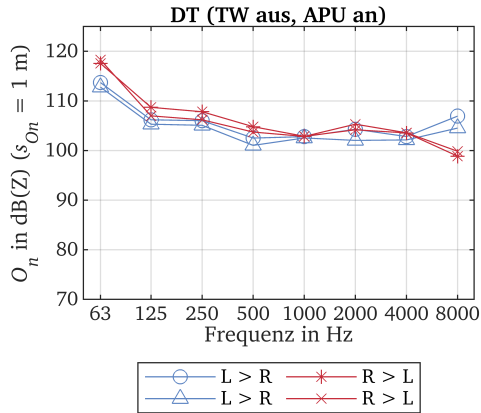


Abbildung 4.22.: Oktavschalldruckpegel O_n für die Konfiguration DT (TW aus, APU an) (Bezugsentfernung $s_{On} = 1\text{ m}$).

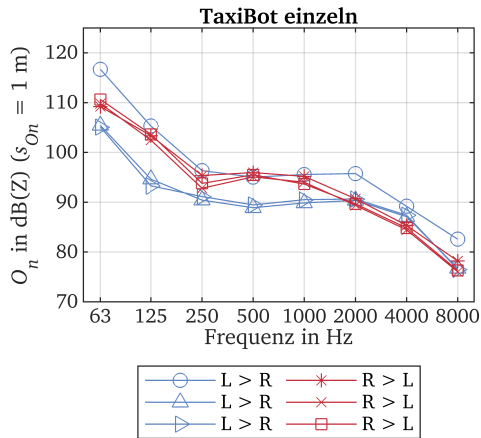


Abbildung 4.23.: Oktavschalldruckpegel O_n für die Konfiguration TaxiBot einzeln (Bezugsentfernung $s_{On} = 1\text{ m}$).

4.3.3 Standgeräusch

In Ergänzung zum Vorbeifahrtgeräusch wurde das Standgeräusch des TaxiBots und des Vergleichsschleppers (Goldhofer AST-2) gemessen. Während der Messungen lief der Motor im Leerlauf. Hierfür wurden die Schlepper mittig im jeweiligen Messraster positioniert und der energieäquivalente Dauerschallpegel für eine Dauer von 10 s ($L_{p,A,eq,10s}$) auf jeder der zuvor definierten Positionen erfasst (vgl. Unterabschnitt 4.2.1, Abbildung 4.4 und Abbildung 4.5). Abbildung 4.24 und Abbildung 4.25 veranschaulichen das Ergebnis der Messungen in Form eines Konturplots. Die Werte zwischen den Messpositionen sind linear interpoliert. Der Vergleichsschlepper erzeugt einen maximalen Schalldruckpegel von 79,4 dB(A) auf der linken Seite des Schleppers. Zu diesem Pegel trägt zum einen der Motor bei, der hinter der Fahrerkabine in der Mitte des Schleppers angeordnet ist, und zum anderen ein Hydraulikkühler, der sich auf der linken Seite des Schleppers befindet. Der niedrigste Schalldruckpegel wurde am Punkt (0 m/11,5 m) gemessen und beträgt 66,9 dB(A). Der Konturplot ist nicht symmetrisch zur Längsachse des Schleppers, da sich der Auspuffausgang vor dem Hinterreifen auf der rechten Seite befindet. Im Vergleich dazu ist der Konturplot des TaxiBots aufgrund seines symmetrischen Aufbaus nahezu längssymmetrisch. Jeweils zwei Dieselmotoren und Auspuffausgänge befinden sich auf der rechten und linken Seite des Fahrzeugs. Im Bereich zwischen Motor und Auspuffausgang wurde ein maximaler Schalldruckpegel von 83,5 dB(A) aufgezeichnet. Im Heck des Fahrzeugs befinden sich zwei Lüftungsaggregate, die an der Messposition (3 m/6,25 m) einen Schalldruckpegel von 79,1 dB(A) verursachen. Der geringste Schalldruckpegel wurde auf der Position (17 m/6,25 m) vor dem TaxiBot gemessen und beträgt 70,3 dB(A). Die um den TaxiBot herum gemessenen Schalldruckpegel sind aufgrund der höheren Motorleistung und der beiden diesel-elektrischen Hybridmotoren auf beiden Seiten des TaxiBots höher als beim Vergleichsschlepper.

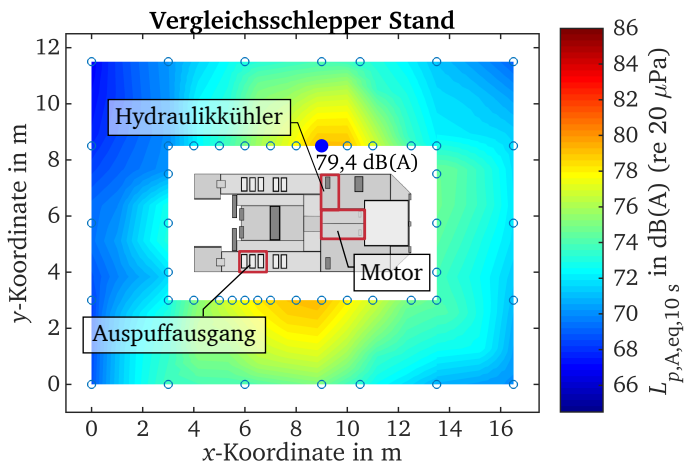


Abbildung 4.24.: Standgeräusch des Vergleichsschleppers Goldhofer AST-2. Höhe des Messmikrofons 1,2 m.

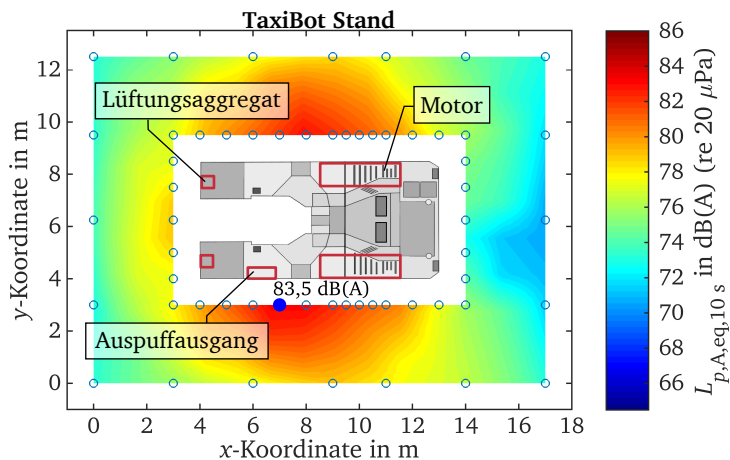


Abbildung 4.25.: Standgeräusch des TaxiBots. Höhe des Messmikrofons 1,2 m.

4.4 Diskussion der Messergebnisse

In diesem Abschnitt werden die erzielten Messergebnisse interpretiert. Anschließend wird die Methodik bewertet und ein Zwischenfazit gezogen.

4.4.1 Interpretation

Messergebnisse beinhalten Effekte einer Vielzahl von Einflussfaktoren und sind mit Unsicherheiten behaftet. So kann eine Messung beispielsweise unter anderen Messbedingungen (z. B. andere Messstrecke, Messort oder Messequipment) einen anderen Messwert erbringen. Daher muss ein Messergebnis immer zusammen mit seiner Unsicherheit angegeben werden [70, S. 55]. Für die im Abschnitt 4.3 dargestellten Ergebnisse errechnet sich die erweiterte Messunsicherheit zu $U = 2,16 \text{ dB}$. Die Berechnung der erweiterten Messunsicherheit sowie die Darstellung der Einflussfaktoren ist im Anhang B.8 zu finden. Im Folgenden werden die wesentlichsten Einflussfaktoren diskutiert.

Die Schallausbreitung wird von meteorologischen Parametern wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Windgeschwindigkeit und Windrichtung beeinflusst. Dieser Einfluss kann in den beiden Messnächten jedoch als gering eingestuft werden. Während beider Testnächte gab es keinen Niederschlag und die gemessenen Temperaturen befanden sich innerhalb der normativ vorgegebenen Werte (vgl. Anhang B.1, Anforderung 4.1.). Eine Windgeschwindigkeit von 5 m/s wurde während der ersten Messnacht nicht überschritten. Während der zweiten Messnacht wurde dieser Wert zwar mehrfach, jedoch immer nur kurzzeitig, überschritten. Während der gesamten Messnacht betrug die Windgeschwindigkeit maximal $5,4 \text{ m/s}$. Um 01:30:00 Uhr wurde der normativ vorgegebene Wert von 5 m/s zum ersten Mal überschritten. Zu diesem Zeitpunkt wurden jedoch keine Schalldruckpegel aufgezeichnet. Die Vorbeifahrtmessungen waren abgeschlossen und die Messungen des TaxiBots im Stand wurden vorbereitet. Im Zeitraum von 2:50:00 Uhr bis 03:10:00 Uhr betrug die Windgeschwindigkeit erneut mehr als 5 m/s . Dabei wurden ab 03:01:44 Uhr Messwerte des TaxiBots im Stand aufgezeichnet. Die Messungen erfolgten in 1 m bzw. 4 m Entfernung vom Schlepper, sodass über die kurze Entfernung ein vernachlässigbarer Einfluss angenommen werden kann.

Zusammen mit der Windgeschwindigkeit ist die Windrichtung ein weiterer zu diskutierender Einflussfaktor. Wie in Abbildung 4.11 (Unterabschnitt 4.2.4) zu sehen, hat die Messstrecke, die sich auf der Startbahn 18 (entspricht 180° Kompasskurs) befindet, eine Nord-Süd-Ausrichtung. In der ersten Messnacht wehte der Wind aus Richtungen von 180° bis 220° , in der zweiten Messnacht aus Richtungen von 3° bis 34° . Sogenannte Mitwindausbreitungsbedingungen gelten jedoch nur,

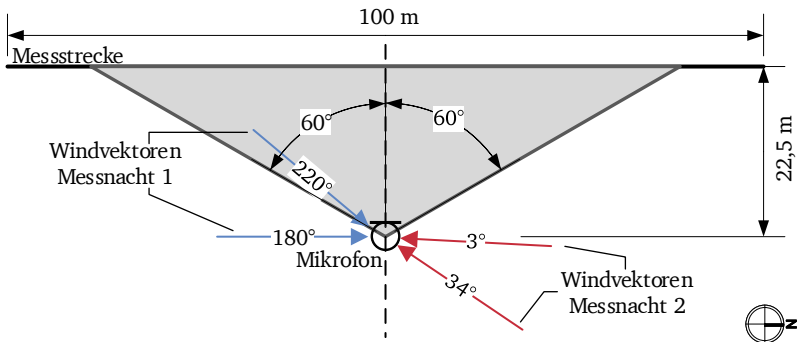


Abbildung 4.26.: Definition des Sektors für Mitwindausbreitungsbedingungen und Windvektoren der beiden Messnächte. [Eigene Darstellung]

wenn der Wind in einem Sektor von bis zu $\pm 60^\circ$ von der Messstrecke in Richtung des Messortes weht [58, S. 9]. Abbildung 4.26 lässt jedoch erkennen, dass in beiden Messnächten größtenteils keine Mitwindwetterlage vorlag. Lediglich bei einer Windrichtung von 220° in der ersten Messnacht kann eine schwache Mitwindwetterlage angenommen werden. Da bei den Messungen eine Windkomponente entgegen der Schallausbreitungsrichtung auftritt, verlängert sich der Ausbreitungsweg scheinbar, und es werden im Vergleich zu Windstille geringere Pegel gemessen.

In beiden Testnächten wurde der in DIN 45643 [71] (vgl. Anhang B.1, Anforderung 4.2.) festgelegte Grenzwert für die relative Luftfeuchtigkeit von 80 % überschritten. In der ersten Testnacht wurden 89 % erreicht. In der zweiten Nacht waren es knapp 83 %. Die Luftfeuchtigkeit hat einen Einfluss auf die Luftabsorption. Diese ist proportional zur durchlaufenen Wegstrecke des Schalls und hängt zusätzlich von der Frequenz und Lufttemperatur ab. Der Einfluss einer hohen Luftfeuchtigkeit auf den gemessenen Schalldruckpegel befindet sich jedoch im Hundertstelbereich, insbesondere da die Messungen in geringer Entfernung zur Schallquelle durchgeführt werden [72, S. 198].

Die Vorbeifahrtmessungen zeigen, dass durch das Ausschalten der Triebwerke beim DT im Vergleich zum Rollen mit Triebwerkschub eine deutliche Reduzierung der emittierten Schalldruckpegel erreicht wird und das obwohl beim DT die APU in Betrieb ist. Nach Fastl und Zwicker [73] entspricht im Allgemeinen bei einem gleichbleibenden, gleichartigen Geräusch (bevorzugt im Bereich über 40 dB) ein Schalldruckpegelunterschied von 10 dB etwa dem doppelten bzw. halbierten Lautheitseindruck. Die beim DT erreichte Größenordnung der Schalldruckpegelabnahme ($\Delta L_{p,A,E;m} = 12,7 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,F;\text{max};m} = 16,6 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,\text{eq};m} = 13,2 \text{ dB(A)}$)

lässt somit auf eine eindeutige, subjektiv empfundene Reduzierung der Lautheit des Geräusches schließen. Dies ist insbesondere der Fall, da die Vorbeifahrtgeräusche unterschiedliche Frequenzspektren aufweisen und das menschliche Gehör Änderungen hierbei noch sensibler wahrnimmt [73]. Die Größenordnung der Schalldruckpegelabnahme entspricht den bereits während des Vortests am 15. Januar 2014 ermittelten Werten (vgl. Unterabschnitt 4.2.3).

Das DT mit laufenden Triebwerken und laufender APU weist nur geringe Schallpegelunterschiede im Vergleich zum Rollen mit Triebwerkschub auf ($\Delta L_{p,A,E;m} = 0,3 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,E;\text{max};m} = 0,1 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,\text{eq};m} = 0,1 \text{ dB(A)}$). Die Unterschiede bewegen sich im Rahmen der Messunsicherheit. Daraus lässt sich ableiten, dass die Flugzeugtriebwerke als Primärschallquelle maßgeblich zum gemessenen Schalldruckpegel beitragen und die Schallemissionen des TaxiBots sowie die der APU im Vergleich vernachlässigbar sind. Die gemittelten Schalldruckpegel der Einzelvorbeifahrten des TaxiBots bestätigen dies. Die Schalldruckpegel liegen weit unter denen der Konfiguration „DT (TW an, APU an)“ ($\Delta L_{p,A,E;m} = 27,4 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,E;\text{max};m} = 31,6 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,\text{eq};m} = 27,1 \text{ dB(A)}$) und liefern einen vernachlässigbaren Beitrag zum Gesamtschalldruckpegel. Dies wird durch die Spektrogramme der entsprechenden Vorbeifahrten (vgl. Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17) sowie durch die berechneten Oktavschalldruckpegel (vgl. Abbildung 4.20 und Abbildung 4.21) bestätigt.

Beim Vergleich der Einzelvorbeifahrten der Schlepper fällt auf, dass der Vergleichsschlepper etwas höhere Schalldruckpegel aufweist als der TaxiBot ($\Delta L_{p,A,E;m} = 1,7 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,E;\text{max};m} = 2,3 \text{ dB(A)}$, $\Delta L_{p,A,\text{eq};m} = 0,4 \text{ dB(A)}$). Dieses Ergebnis ist auffällig und entspricht nicht den Erwartungen. Da der TaxiBot mit zwei Dieselmotoren (2 x 294 kW Leistung [14]) ausgestattet ist und der Vergleichsschlepper nur einen Motor mit einer Leistung von 360 kW besitzt⁴, sollten die Vorbeifahrtpegel des Vergleichsschleppers niedriger ausfallen. Der Hauptgrund hierfür liegt in der Umrechnung der beim Vergleichsschlepper gemessenen Schalldruckpegel (vgl. Unterabschnitt 4.2.6). Die Schalldruckpegel wurden in einer Entfernung von 7,5 m zur Mittellinie des Messfensters gemessen und mussten für die Vergleichbarkeit auf eine Entfernung von 22,5 m umgerechnet werden. Dies erfolgt auf Basis der geometrischen Dämpfung sowie unter Vernachlässigung von Einflussfaktoren wie Luftabsorption, Bodendämpfung und Wetter und führt zu einer konservativen Abschätzung des realen Immissionspegels. Weiterhin wird der Vorbeifahrtpegel stark durch die dem Mikrofon zugewandten Schallquellen beeinflusst, da die Karosserie des Fahrzeugs eine abschirmende Wirkung auf den Schall der abgewandten Seite hat. Beim TaxiBot befinden sich auf der Seite des Mikrofons

⁴ J. Dietrich (Goldhofer AG), „Motorisierung der Schlepper Goldhofer AST-1 und AST-2“, Telefonische Mitteilung, Mai 2015.

jeweils ein Motor und ein Auspuffausgang. Dieser eine Motor weist eine etwas geringere Leistung auf als der sich in der Mitte des Vergleichsschleppers befindende Motor. Dies könnte dazu beitragen, dass der Schalldruckpegel des Vergleichsschleppers etwas höher ist als der des TaxiBots.

Die Vorbeifahrtpegel des Vergleichsschleppers sind aufgrund des einseitigen Auspuffausgangs stark abhängig von der Vorbeifahrtrichtung. Führt der Schlepper von links nach rechts am Mikrofon vorbei, so ist der Auspuffausgang dem Mikrofon zugewandt und es treten um bis zu 3 dB(A) höhere Schalldruckpegel auf.

Der Schalldruckpegel-Zeitverlauf (vgl. Abbildung 4.15) sowie das Spektrogramm (vgl. Abbildung 4.16) des AETO zeigen, dass der maximale Schalldruckpegel etwa in der Mitte des Messfensters auftritt. Wenn sich das Flugzeug dem Mikrofon nähert, wird der gemessene Schalldruckpegel im Wesentlichen von dem nach vorne abgestrahlten Schall des Triebwerkfans und Verdichters beeinflusst. Das Maximum des Schalldruckpegels wird dann erreicht, wenn die Triebwerksgondel das Mikrofon passiert hat und der Schalldruckpegel vom Abgasstrahl dominiert wird, der aus der Triebwerkdüse austritt. Einen zusätzlichen Beitrag zum Schalldruckpegel leistet der von der Turbine erzeugte Schall, der sich über den Abgasstrahl nach hinten ausbreitet, sowie ein Teil des vom Fan erzeugten Schalls, der durch die Strömung im Sekundärstrom auch nach hinten aus dem Triebwerk getragen wird. Die rotierenden Komponenten des Triebwerks erzeugen neben einem breitbandigen Frequenzspektrum insbesondere auch Töne, die als einzelne Frequenzlinien im Spektrogramm zu erkennen sind.

Beim DT (TW aus, APU an) tritt der maximale Schalldruckpegel nicht wie beim AETO in der Mitte des Messfensters auf, sondern dann, wenn sich der APU-Abgasauslass etwa 18 m an der Mikrofonposition vorbeibewegt hat. Das Frequenzspektrum der Vorbeifahrt (vgl. Abbildung 4.18) weist auch hier neben einem breitbandigem Spektrum einzelne Töne auf, die hauptsächlich durch die Rotation von Verdichter und Turbine der APU verursacht werden. Zudem ergibt sich in einem Frequenzband um 2.000 Hz eine Überlagerung der von der APU und vom TaxiBot emittierten Schalldruckpegel (vgl. Abbildung 4.19). Während bei der Einzelvorbeifahrt des TaxiBots der Schalldruckpegel in diesem Frequenzbereich bei ca. 50 dB liegt, sind es beim DT bis zu 65 dB.

Die in Abbildung 4.20 bis Abbildung 4.23 dargestellten Oktavschalldruckpegel und Trendlinien zeigen, dass die Messwerte je Vorbeifahrtrichtung zwar gut reproduziert werden konnten, es aber Unterschiede in den Vorbeifahrtrichtungen gibt. Die genauen Ursachen für diese Unterschiede lassen sich nicht mit Sicherheit be-

nennen. Dafür sind weitere Untersuchungen, z.B. mit der akustischen Nahfeld-Holografie⁵, nötig. Im Folgenden werden Vermutungen diesbezüglich angestellt.

Bei den Konfigurationen „AETO B737-500“ und „DT (TW an, APU an)“, sind die Triebwerke die Hauptschallquelle. Hier liegen die Oktavschalldruckpegel der Fahrtrichtung $L > R$ im Frequenzbereich von 500 Hz bis 2.000 Hz etwas über denen der Richtung $R > L$. Grund hierfür könnte sein, dass die Triebwerke unterschiedlich starken Schub geliefert haben oder die Triebwerkdrehzahl sich unterschieden hat. Unterschiedliche Verschmutzungsgrade, Spaltmaße, Fertigungstoleranzen sind weitere mögliche Gründe für die unterschiedlichen Frequenzcharakteristiken. Die Oktavschalldruckpegel des DT (TW aus, APU an) sind geringfügig höher, wenn das Flugzeug-Schlepper-Gespann von rechts nach links am Mikrofon vorbeifährt. Auffällig ist jedoch die Oktavmittenfrequenz von 8.000 Hz⁶. Hier wurden für die Vorbeifahrtrichtung $L > R$ deutlich höhere Pegel gemessen. Die Ursache hierfür könnte die Öffnung sein, durch die die Luft für die APU angesaugt wird und die auf der linken Seite im hinteren Rumpfbereich des Flugzeugs angeordnet ist. Die Einzelvorbeifahrt des TaxiBots weist für die Vorbeifahrtrichtung $R > L$ im Frequenzbereich unter 2.000 Hz etwas höhere Pegel auf, obwohl der Schlepper längssymmetrisch aufgebaut ist. Die Gründe für die unterschiedliche Abstrahlcharakteristik können vielfältig sein. Beispielsweise könnte es Unterschiede im Verbrennungsgeräusch, Auspuffgeräusch, Ansaugergeräusch oder Lüftergeräusch gegeben haben. Für den Vergleichsschlepper konnten nachträglich keine Oktavpegel mehr ermittelt werden. Dennoch ist auf Grundlage der Messungen im Stand (vgl. Unterabschnitt 4.3.3) ein Unterschied in der Vorbeifahrtrichtung zu vermuten. Das Motoraggregat befindet sich zwar mittig im Schlepper, der Auspuffausgang ist jedoch auf der rechten Seite des Schleppers angebracht. Durch das Auspuffgeräusch ergibt sich bei der Fahrtrichtung $L > R$ ein anderes Oktavspektrum als in umgekehrter Fahrtrichtung, bei der im Wesentlichen der Motor abstrahlt.

4.4.2 Methodische Bewertung

Die Methoden zur Beurteilung von Vorbeifahrt- sowie Standgeräuschen erwiesen sich als gut geeignet, um reproduzierbare Schalldruckpegel aufzunehmen. Insbesondere das Messequipment der zweiten Messnacht war hierfür geeignet. Im

⁵ Bei der akustischen Nahfeld-Holografie wird mithilfe einer zweidimensionalen Mikrofonmatrix (Mikrofonarray) das akustische Strahlungsfeld einer ebenen Abstrahlungsfläche parallel zur tatsächlichen Schallfeldebene aufgenommen. Durch die Erweiterung des Mikrofonarrays mit einem Datenrekorder, einem Notebook und einer Digitalkamera sowie Software entsteht ein Messsystem, das Schallquellen ähnlich eines Wärmebildes sichtbar werden lässt. [21]

⁶ Die Oktavmittenfrequenz von 8.000 Hz umfasst einen Frequenzbereich von 5.680 Hz bis 11.360 Hz

Gegensatz zur ersten Messnacht standen Lichtschranken zur Verfügung, die einen genau definierten Messbereich ermöglichen. In der ersten Messnacht wurde die Aufnahme des Schalldruckpegels von manuellen Lichtsignalen gesteuert. Aufgrund der Reaktionszeit der Versuchsdurchführenden kam es zu Verzögerungen bei der Auslösung der Messungen, sodass die Länge des Messfensters nicht immer exakt eingehalten werden konnte. Daher können keine genauen rechnerischen Rückschlüsse auf die Vorbeifahrtgeschwindigkeit gemacht werden. Hier liegen nur die Angaben des Piloten bzw. Schlepperfahrers vor. Darüber hinaus konnten in der zweiten Messnacht mithilfe einer Wetterstation in regelmäßigen Abständen meteorologische Parameter aufgezeichnet werden. In der ersten Messnacht hingegen standen nur die Daten des Deutschen Wetterdienstes zur Verfügung. Soweit wie möglich wurde die Vermessung der Testkonfigurationen mit dem Soundbook, den Lichtschranken und der Wetterstation wiederholt. Lediglich die Schalldruckpegel des Vergleichsschleppers (Vorbeifahrt- sowie Standgeräusch) wurden mit einem HSPM aufgenommen. Die Vorbeifahrtpegel des Vergleichsschleppers wurden zudem, anders als alle anderen Vorbeifahrtpegel, in einer Entfernung von 7,5 m aufgenommen.

Der bei den Messungen des Vorbeifahrtgeräusches eingesetzte Pilot bzw. Schlepperfahrer hat ebenfalls einen Einfluss auf die Messergebnisse. Er ist dafür verantwortlich, die Geschwindigkeit konstant zu halten und das Flugzeug bzw. Fahrzeug auf der Mittellinie des Messfensters zu halten. Abweichungen beim Mikrofonabstand der Schallquelle sowie unterschiedliche Vorbeifahrtgeschwindigkeiten und eine zeitliche Veränderung der Geschwindigkeit innerhalb einer Vorbeifahrt, können dazu führen, dass unzutreffende Rückschlüsse über den Zusammenhang von Vorbeifahrtrichtung und Abstrahlcharakteristik der Schallquelle gezogen werden. Um diese Einflüsse zu eliminieren und beide Seiten der Schallquelle gleichzeitig zu vermessen, könnte ein zweites Mikrofon eingesetzt werden, das auf der gegenüberliegenden Seite des Messfensters platziert wird. Auf diese Weise können beide Fahrzeugseiten gleichzeitig vermessen und genauer untersucht werden, ob die Schallabstrahlung der beiden Fahrzeug- bzw. Flugzeugseiten tatsächlich unterschiedlich ist. Dazu müsste jedoch das zweite Mikrofon mittels Kabel mit dem Messrechner verbunden werden und könnte beim Überfahren beschädigt werden. Alternativ wäre ein zweiter Messrechner notwendig, der mit dem ersten synchronisiert wird.

4.4.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde der Einsatz des TaxiBots für das operationelle Schleppen eines Flugzeugs vom Typ B737-500 im Vergleich zum konventionellen Rollen mittels Triebwerkschub untersucht. Dazu wurden zunächst Anforderungen an akustische Messungen analysiert sowie aus Standards und Normen abgeleitet, die für Flug- bzw. Straßenverkehrsgeräusche gelten. Anhand dieser Anforderungen wurden zwei Messmethoden entwickelt, die es ermöglichen, den TaxiBot in verschiedenen Testkonfigurationen zu bewerten. Zudem wurde anhand der ermittelten Anforderungen Messequipment ausgewählt und der Aufbau der Messkette entwickelt. In zwei Messnächten wurden alle zuvor definierten Konfigurationen untersucht und die Schalldruckpegel von Vorbeifahrt- sowie Standgeräuschen gemessen.

Beim DT wird das Flugzeug bewegt, ohne dass dabei die Triebwerke laufen. Obwohl aber die APU in Betrieb ist, konnte eine deutliche Reduzierung des Schalldruckpegels im Vergleich zum AETO nachgewiesen werden. Die beiden Konfigurationen AETO und DT haben unterschiedliche Hauptschallquellen. Beim AETO sind es die Triebwerke, wohingegen beim DT die APU die primäre Schallquelle ist. Die beiden Schallquellen unterscheiden sich in ihren Frequenzspektren und weisen je nach Vorbeifahrtrichtung unterschiedliche Abstrahlcharakteristiken und Schalldruckpegel auf. Eine direkte Gegenüberstellung von TaxiBot und Vergleichsschlepper im Stand mit im Leerlauf laufendem Motor zeigt, dass der TaxiBot aufgrund der stärkeren Motorisierung rund um den Schlepper höhere Schalldruckpegel aufweist. Im Vergleich jedoch zur APU oder den Triebwerken hat der TaxiBot einen geringen Einfluss auf den Gesamtschalldruckpegel beim DT.

Anhand der Messergebnisse konnte gezeigt werden, dass durch den Einsatz des TaxiBots eine deutliche Reduzierung des Bodenlärms erreicht werden kann. Die Messungen bilden jedoch nur einzelne Vorgänge ab. Wie sich der Schall ausbreitet und welche Pegel wo erreicht werden, kann nur mittels einer Schallimmissionsberechnung untersucht werden.



5 Schallimmissionsberechnung zur Untersuchung operationeller Schleppverfahren

Nachdem anhand von Messungen gezeigt wurde, dass das operationelle Schleppen und damit der Einsatz des TaxiBots Bodenlärm vermindern kann, werden in diesem Kapitel Schallimmissionsberechnungen durchgeführt. Hierfür werden zunächst die Modellbildung und Implementierung des Programms zur Berechnung der Schallimmissionen beschrieben. Die Berechnungen erfolgen exemplarisch am Beispiel des Flughafens Frankfurt, es können jedoch auch beliebige andere Flughafenlayouts damit untersucht werden. Für die Untersuchung werden unterschiedliche Szenarien definiert, berechnet und miteinander verglichen. Die Ergebnisse werden abschließend diskutiert.

5.1 Modellbildung und Implementierung der Schallimmissionsberechnung

Die akustische Belastung durch Rollverkehr wird nach den Berechnungsalgorithmen der Anlage 2 der Ersten Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen, „Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen“ (AzB) ermittelt (1. FlugLSV¹ [17]). Der Vorteil der AzB liegt darin, dass diese bereits Vorgehensweisen beschreibt, um Rollverkehr sowie den Beitrag von APUs bei der Berechnung des Schalldruckpegels am Immissionsort zu berücksichtigen. Außerdem werden standardisierte Datenblätter mit akustischen und flugbetrieblichen Kenngrößen (z. B. Oktavschalldruckpegel, Quellhöhe) für Luftfahrzeuge bereitgestellt. Im Folgenden wird analog zum Wortlaut der AzB der Begriff „Luftfahrzeug“ als Überbegriff für Flugzeuge verwendet.

Als Berechnungsgrundlage dienen, entsprechend der AzB, die Flugbewegungen der sechs verkehrsreichsten Monate eines Jahres (6 v. M.). Der Fokus dieser Arbeit liegt in der Betrachtung des am Boden eines Flughafens entstehenden Schalls (vgl. Unterabschnitt 2.6.1). Aus diesem Grund werden in den Berechnungen nur Bodenoperationen und insbesondere Rollvorgänge inklusive der Beiträge von APUs

¹ Erste Verordnung zur Durchführung des Gesetzes zum Schutz gegen Fluglärm.

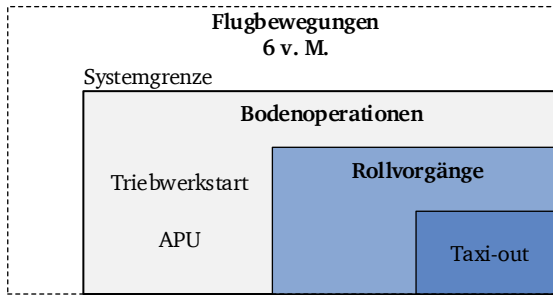


Abbildung 5.1.: Systemgrenze des Programms zur Berechnung der Schallimmissionen von Flugzeugbodenbewegungen. [Eigene Darstellung]

und Triebwerkstarts betrachtet. Überflüge sowie Starts und Landungen sind nicht Bestandteil des Bodenlärms und werden daher nicht berücksichtigt. Zudem finden nur Abrollvorgänge, sog. Taxi-outs, Eingang in die Berechnung. Nach Informationen der Lufthansa LEOS² besteht der Anwendungsfall des TaxiBots in der Abfertigung von Taxi-out Vorgängen. Der Grund hierfür ist, dass bei Taxi-in Vorgängen, also Rollvorgängen von der Landebahn zur Abstellposition des Flugzeugs, die Rollzeit zwischen Landebahn und Abstellposition i. d. R. wesentlich geringer ist als die von der Abstellposition zur Startbahn. Zudem ist die Zeit, die zum Abkühlen der Triebwerke nach der Landung benötigt wird, länger als die Aufwärmzeit, sodass sich beim Taxi-in ein wesentlich geringerer effektiver Nutzen eines TaxiBot-Einsatzes ergibt. Darüber hinaus ist die Kopplung von TaxiBot und Flugzeug nach der Landung wesentlich aufwendiger, da die zu benutzende Landebahn oft erst ca. 10 bis 15 Minuten vor der Landung zugewiesen wird und der tatsächlich genutzte Abrollweg erst mit Abschluss der Landung bekannt ist. Die Systemgrenze des Berechnungsprogramms ist in Abbildung 5.1 visualisiert.

Den schematischen Aufbau des Berechnungsprogramms zeigt Abbildung 5.2. Die Implementierung erfolgte mit der Software MATLAB. Grundlage des Berechnungsprogramms bildet ein Rechenraster mit Punkten, für die der Immissionsschalldruckpegel berechnet wird. Hierzu werden zusätzlich Eingangsdaten benötigt, die ein Flughafen, wie in der Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD) (1. FlugLSV, Anlage 1 [74]) vorgesehen, im sog. Datenerfassungssystem (DES) bereitstellen muss. Zudem werden die in den Datenblättern der AzB [17] veröffentlichten physikalisch-technischen Kenngrößen der Luftfahrzeuge verwendet. Die sich auf den Rollwegen bewegendes Luftfahrzeuge werden als bewegte Punktschallquellen

² S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Experteninterview“, Persönliches Gespräch, April 2017.

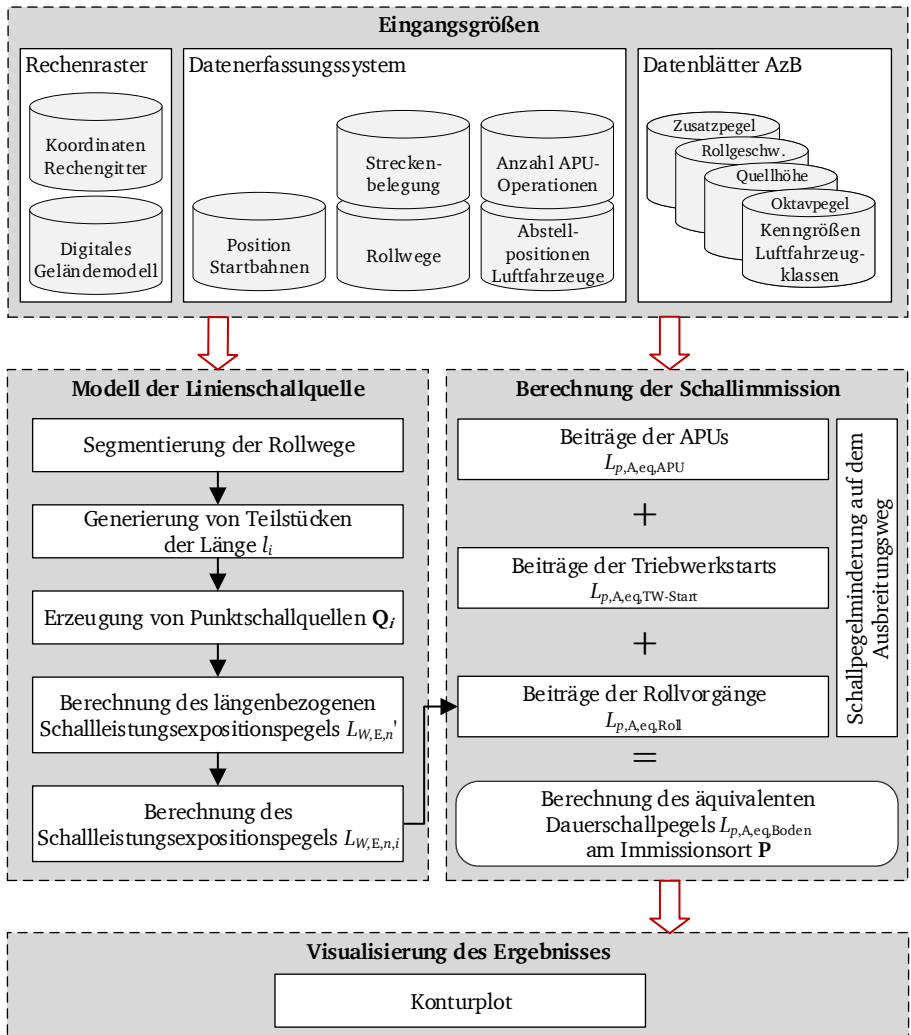


Abbildung 5.2.: Aufbau des Programms zur Berechnung der Schallimmissionen von Flugzeugbodenbewegungen. [Eigene Darstellung]

modelliert, für die an jedem Punkt der Trajektorie die Schallleistung, die Geschwindigkeit und die Abstrahlcharakteristik bekannt sind. Die bewegte Punktschallquelle wird durch eine Linienschallquelle nachgebildet, die wiederum in Teilstücke zerlegt wird. Basierend auf diesen Teilstücken werden Ausbreitungsrechnungen erstellt und der äquivalente Dauerschallpegel an den Punkten des Rechenrasters ermittelt. Die Visualisierung des Ergebnisses erfolgt mittels Darstellung von Isolinien, für die $L_{p,A,eq} = \text{konst.}$ gilt (Konturplot).

Gemäß AzB [17] werden in der Berechnung Effekte wie Abschirmung, Beugung oder Reflexionen durch Hindernisse nicht modelliert. Außerdem wird ein meteorologischer Einfluss auf die Schallausbreitung vernachlässigt.

Die einzelnen Bestandteile des Berechnungsprogramms (Eingangsgrößen, Berechnungsmethode, Modellbildung und Ausgangsgrößen) werden in den folgenden Unterabschnitten erläutert.

5.1.1 Eingangsgrößen

Folgende Eingangsgrößen bilden die Grundlage des Programms zur Schallimmissionsberechnung:

5.1.1.1 Rechengitter

Gemäß AzB [17] wird zur Berechnung der Immissionskenngrößen ein rechtwinkliges Rechengitter mit einer Gitterweite von 50 m verwendet. Die Achsen des Rechengitters sind parallel zu den Rechts- und Hochachsen des UTM-Koordinatensystems³ ausgerichtet. Der Immissionsort befindet sich in einer Höhe von 4 m über dem Boden.

5.1.1.2 Topografie

Als Topographie wird das Höhenprofil eines Geländes bezeichnet. Die Daten zur Topografie liegen als Digitales Geländemodell (DGM) vor und müssen zur Bestimmung der Schallpegelminderung auf dem Ausbreitungsweg berücksichtigt werden [17, S. 34]. Die Höhenkoordinaten der Emissions- und Immissionsorte setzen sich

³ Das Universale Transversale Mercator-Koordinatensystem (UTM-System) ist eine winkeltreue Abbildung von Punkten in ein ebenes, rechtwinkliges Koordinatensystem für den Bereich von 60 Zonen von je 6° breiter Ost-West-Ausdehnung. Als Bezugsellipsoid ist GRS80 verbindlich vorgeschrieben. [75]

aus der Höhenkoordinate im DGM und der Höhe der Schallquelle bzw. des Empfängers über dem Boden zusammen. In der Ausbreitungsrechnung werden die Höhenkoordinaten sowohl zur Bestimmung der Ausbreitungsentfernung s als auch zur Bestimmung des Höhenwinkels α verwendet.

5.1.1.3 Abstellpositionen der Luftfahrzeuge

Die Abstellpositionen der Luftfahrzeuge liegen zusammen mit ihrer Bezeichnung als zweidimensionale UTM-Koordinaten vor. Zur weiteren Verwendung dieser Koordinaten werden diese um die dritte Dimension erweitert, indem die Topografiehöhe ermittelt wird. Dazu werden die Koordinaten der Abstellpositionen mit den Koordinaten des DGM verglichen und der Abstellposition die Höhe des Punktes mit dem kleinsten Abstand zugewiesen.

5.1.1.4 Beschreibung der Rollwege

Die Definition der Rollwege erfolgt im DES. Dabei wird der Abflug-Rollweg entgegen seiner tatsächlichen Rollrichtung, nämlich vom Startpunkt bis zur Abstellposition, beschrieben (siehe Abbildung 5.3). Jeder Abflug-Rollweg ist im DES gesondert beschrieben. Im Startpunkt liegt der Ursprung des lokalen Rollwegkoordinatensystems mit der Bogenlängenkoordinate σ und einer darauf stehenden Lot-Koordinate ρ . Ein Rollwegabschnitt ist entweder durch eine Gerade mit Angabe der Länge in Meter oder durch einen Kreisbogen dargestellt. Der Kreisbogen wird dabei durch die Angaben L (Linkskurve) bzw. R (Rechtskurve) sowie die Kursänderung der Kurve in Grad und den Kurvenradius in Meter beschrieben. Im Anhang C.1, Tabelle C.1 und Abbildung C.1, ist die Beschreibung der Rollwege an einem Beispiel verdeutlicht.

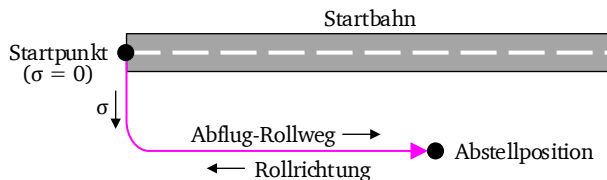


Abbildung 5.3.: Definition des Abflug-Rollwegs. [Eigene Darstellung nach [17, S. 27]]

5.1.1.5 Eigenschaften der Schallquellen

Die AzB [17] fasst Luftfahrzeugtypen mit ähnlichen technischen Parametern zu Luftfahrzeuggruppen zusammen. Die Gruppen sind wiederum in Start- und Landeklassen unterteilt. Für jede Start- und Landeklasse gibt es ein Datenblatt, das Angaben zu Oktavschalldruckpegeln O_n der Triebwerke für eine Bezugsentfernung von $s_{On} = 300\text{ m}$ enthält. Weiterhin enthalten die Datenblätter Informationen zur Quellhöhe h_Q , zugehöriger APU-Klasse sowie einen Zusatzpegel Z . Der Zusatzpegel beträgt für alle Luftfahrzeuggruppen $Z = -10\text{ dB}$ und bleibt entlang des Rollwegs konstant. Für die Betrachtung von Rollvorgängen gibt die AzB [17] vor, die Datensätze der Landeklassen zu verwenden. Für die APU-Klassen gibt es ebenfalls Datenblätter, die Oktavschalldruckpegel für eine Bezugsentfernung von $s_{On} = 1\text{ m}$ sowie die Quellhöhe enthalten. Sowohl die Triebwerke als auch die APU werden als Punktquelle mit einer zu allen Seiten hin gleichförmigen Abstrahlung angenommen.

Die Definition der Luftfahrzeuggruppen ist in der AzD [74, S. 9-12] zu finden. Tabelle C.2 im Anhang C.2 enthält Beispiele für Luftfahrzeugtypen, die den einzelnen Luftfahrzeuggruppen zugeordnet werden können.

5.1.1.6 Streckenbelegung und Anzahl der APU-Einsätze

Die Anzahl der Abrollvorgänge ist ebenfalls dem DES zu entnehmen. Das DES enthält Streckenbelegungen für jeden Rollweg und unterscheidet dabei zwischen Luftfahrzeuggruppen sowie Tag- und Nachtflügen, die unterschiedlich gewichtet in die Berechnung eingehen. Unter Tagflügen sind Flugbewegungen mit Luftfahrzeugen in der Zeit von 06:00 Uhr bis 22:00 Uhr zu verstehen (Gewichtsfaktor $g_r = 1,5$). Nachtflüge sind Flugbewegungen in der Zeit von 22:00 Uhr bis 06:00 Uhr ($g_r = 3$) [61, p. 9]. Ein Beispiel für den Aufbau der Datensätze zeigt Tabelle C.3 im Anhang C.3.

Das DES enthält zudem Informationen zum APU-Betrieb der Luftfahrzeuggruppen. Die Anzahl der APU-Einsätze ist für jede Luftfahrzeuggruppe, nach Abstellposition sortiert und nach Tag und Nacht getrennt, angegeben (siehe Anhang C.3, Tabelle C.4). Für die Berechnung wird angenommen, dass die APU vor dem Start für 30 Minuten auf der Abstellposition in Betrieb ist [74, S. 17].

5.1.1.7 Sonstige Größen

Die AzB [17, S. 36f.] enthält zudem Angaben zum Absorptionskoeffizienten d_n , die asymptotische Pegelminderung G_n und die Konstanten A_n für die A-Bewertung

der Oktavschalldruckpegel. Die Werte werden für die Berechnung des Immissions-schalldruckpegels benötigt und sind im Anhang C.4, Tabelle C.5, zusammengefasst.

5.1.2 Berechnungsmethode

Der äquivalente Dauerschallpegel am Immissionsort setzt sich, analog zu Abbildung 5.2, aus den Einzelbeiträgen des APU-Betriebs, des Triebwerkstarts sowie dem Rollvorgang zusammen. In der AzB [17] ist die Berücksichtigung des Triebwerkstarts nicht vorgesehen. Da aber beim operationellen Schleppen der Ort, an dem die Triebwerke gestartet werden, in Richtung Startbahn verlagert und somit die Schallausbreitung verändert wird, wird der Triebwerkstart mitmodelliert.

Durch Addition der Einzelbeiträge ergibt sich der an einem Immissionsort durch Bodenoperationen von Luftfahrzeugen hervorgerufene und auf die Beurteilungszeit T_r bezogene äquivalente Dauerschallpegel $L_{p,A,eq,Boden,T_r}$ als:

$$L_{p,A,eq,Boden,T_r} = 10 \cdot \lg \left(10^{0,1 \cdot L_{p,A,eq,APU,T_r} \text{ dB}} + 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eq,TW-Start,T_r} \text{ dB}} + 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eq,Roll,T_r} \text{ dB}} \right) \text{ dB} \quad (5.1)$$

Die Pegel der Beurteilungszeiten Tag und Nacht werden im nächsten Schritt mittels Pegeladdition zu einem 24-Stunden-Beurteilungspegel $L_{dn,Boden}$ zusammengefasst [28]:

$$L_{dn,Boden} = 10 \cdot \lg \left[\frac{1}{24} \left(16 \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,eq,Boden,Tag} \text{ dB}} + 8 \cdot 10^{0,1 \cdot (L_{p,A,eq,Boden,Nacht} + 10) \text{ dB}} \right) \right] \text{ dB} \quad (5.2)$$

Dabei wird die erhöhte Störwirkung in der Nacht mit einem Zuschlag von 10 dB berücksichtigt. Der 24-Stunden-Beurteilungspegel stellt das in dieser Arbeit verwendete Maß zur Bewertung der Schallimmissionen dar. Der Beitrag des TaxiBots wird sowohl beim operationellen Schleppen als auch bei der Rückfahrt vernachlässigt. Dies geht aus den Schalldruckpegelmessungen hervor (vgl. Unterabschnitt 4.3.2). Der dabei gemachte Fehler wird in Abschnitt 5.6 diskutiert.

Die Berechnung der einzelnen Beiträge wird im Folgenden beschrieben.

5.1.2.1 Beitrag des APU-Betriebs

Durch den APU-Betrieb einer Luftfahrzeugklasse k ergibt sich an einem Immissionsort im Abstand s von der Abstellposition des Luftfahrzeugs ein A-bewerteter

Schalldruckpegel $L_{p,A}$, der über die Dauer des APU-Betriebs als konstant betrachtet wird. Der A-bewertete Schalldruckpegel $L_{p,A}$ lässt sich nach folgenden Gleichungen berechnen [17, S. 39]:

$$L_{W,n} = O_n - D_s(s_{On}) - D_{L,n}(s_{On}) - D_{\Omega,0} \text{ dB} \quad (5.3)$$

$$L_n = L_{W,n} + D_{I,n} + D_s + D_{L,n} + D_{Z,n} + D_{\Omega} \text{ dB} \quad (5.4)$$

$$L_{p,A} = 10 \cdot \lg \left(\sum_{n=1}^8 10^{0,1 \cdot (L_n + A_n)} \right) \text{ dB} \quad (5.5)$$

mit:

| | |
|----------------|--|
| n | laufende Oktavbandnummer |
| s_{On} | Bezugsentfernung ($s_{On} = 1 \text{ m}$) |
| A_n | Frequenzkorrektur für die A-Bewertung für das n -te Oktavband |
| $L_{W,n}$ | Schallleistungspegel der Hilfgasturbine für das n -te Oktavband |
| O_n | Oktavschalldruckpegel der jeweiligen APU-Klasse für die Bezugsentfernung s_{On} |
| $D_{\Omega,0}$ | Raumwinkelmaß für Bezugsbedingungen ($D_{\Omega,0} = 3 \text{ dB}$) |
| D_{Ω} | Raumwinkelmaß nach Gleichung B.11, Anhang B.7 |
| $D_{I,n}$ | Richtwirkungsmaß für das n -te Oktavband (entfällt, da für APUs eine kugelförmige Abstrahlung vorgegeben wird) |
| D_s | Abstandsmaß nach Gleichung B.10, Anhang B.7 |
| $D_{L,n}$ | Luftabsorptionsmaß für das n -te Oktavband nach Gleichung B.12, Anhang B.7 |
| $D_{Z,n}$ | Bodendämpfungsmaß für das n -te Oktavband nach Gleichung B.13, Anhang B.7 |

Der auf die Beurteilungszeit T_r (Tag bzw. Nacht) bezogene äquivalente Dauerschallpegel $L_{p,A,\text{eq},\text{APU},T_r}$ der APUs an einem Immissionsort ergibt sich durch einen zweifachen Summationsprozess [17, S. 40]:

1. Summation über alle Abstellpositionen N_{AP}
2. Summation über alle Luftfahrzeugklassen N_{Lk}

$$L_{p,A,\text{eq},\text{APU},T_r} = 10 \cdot \lg \left(g_r \cdot \frac{T_0}{T_E} \sum_{k=1}^{N_{Lk}} \sum_{l=1}^{N_{AP}} n_{T_r,k,l} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,k}(s_l)} \cdot \frac{\Delta t_{\text{APU},k}}{T_0} \right) \text{ dB} \quad (5.6)$$

mit:

| | |
|------------------------|--|
| L_{p,A,eq,APU,T_r} | Äquivalenter Dauerschallpegel der APUs zur Beurteilungszeit T_r |
| T_E | Erhebungszeit ($T_E = 1,5552 \cdot 10^7$ s, d. h. 180 Tage) |
| T_0 | Bezugszeit ($T_0 = 1$ s) |
| g_r | Gewichtsfaktor zur Umrechnung der Erhebungszeit auf die Beurteilungszeit (1,5 für tags und 3 für nachts) |
| $n_{T_r,k,l}$ | Anzahl der APU-Operationen der Luftfahrzeugklasse k auf der Abstellposition l während der Beurteilungszeit T_r innerhalb der Erhebungszeit T_E |
| $L_{p,A,k}(s_l)$ | der vom Betrieb einer APU der Luftfahrzeugklasse k auf der Abstellposition l am Immissionsort im Abstand s_l hervorgerufene Abwertete Schalldruckpegel |
| $\Delta t_{APU,k}$ | Laufzeit der APU der Luftfahrzeugklasse k ($\Delta t_{APU,k} = 1.800$ s) |
| $k = 1, \dots, N_{Lk}$ | laufender Index über die Luftfahrzeugklassen |
| $l = 1, \dots, N_{AP}$ | laufender Index über die Abstellpositionen |

5.1.2.2 Beitrag des Triebwerkstarts

Die Berechnung des Beitrags der startenden Triebwerke ($L_{p,A,eq,TW-Start,T_r}$) erfolgt analog zu Gleichung 5.3 bis Gleichung 5.6. In Gleichung 5.3 wird jedoch eine Bezugsentfernung von $s_{On} = 300$ m eingesetzt und in Gleichung 5.4 ein Zusatzpegel von $Z = -10$ dB berücksichtigt. Der Zusatzpegel wird verwendet, da lediglich die Oktavschalldruckpegel aus Anflugdatensätzen verfügbar sind und diese auf ein niedrigeres Schubniveau beim Starten der Triebwerke angepasst werden müssen. Gleichung 5.6 enthält dann statt der Laufzeit der APU die Laufzeit der Triebwerke beim Triebwerkstart $\Delta t_{TW-Start,k}$ für jede Luftfahrzeugklasse k plus eine für das Abarbeiten einer Checkliste veranschlagte Zeitdauer Δt_{Checks} . Typische Zeitdauern für den Triebwerkstart und das Warmlaufen der Triebwerke sind Anhang C.5, Tabelle C.6, zu entnehmen.

Im Fall des AETO werden die Triebwerke entweder bereits während des Pushbacks oder in unmittelbarer Nähe der Abstellposition gestartet. Aus diesem Grund wird die Abstellposition vereinfachend als Emissionsort angenommen. Die hierauf modellierten Quellpunkte emittieren für die Dauer des Triebwerkstarts. Zusätzlich werden 60 s für das Abarbeiten einer Checkliste veranschlagt⁴.

⁴ D. Schmidt-Stiebitz (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten konventionelles Rollen“, E-Mail, Juni 2017.

Beim DT gibt es zwei Optionen für den Zeitpunkt des Triebwerkstarts. Zum einen können die Triebwerke dann gestartet werden, wenn sich das Flugzeug-TaxiBot-Gespann auf der Abkoppelposition befindet, die Parkbremse gesetzt ist und der Pilot wieder in den Driver Control Mode (DCM) geschaltet hat. Während des Unloadings, das vom TaxiBot-Fahrer bewerkstelligt wird, hat der Pilot dann Zeit, die Triebwerke zu starten. Auf der Abkoppelposition wird zusätzlich eine Zeitdauer von 120 s für das Durchführen von Checks berücksichtigt⁵. Die zweite Option ist das Starten der Triebwerke während des operationellen Schleppens. Das hat den Vorteil, dass die Abkoppelposition nicht länger als die für das Unloading benötigte Zeit in Anspruch genommen wird. Der Zeitpunkt des Triebwerkstarts erfolgt idealerweise entsprechend der Dauer zum Starten und Warmlaufen der Triebwerke vor der Startfreigabe. In der vorliegenden Arbeit werden beide Optionen untersucht und es wird davon ausgegangen, dass alle Luftfahrzeugtypen für beide Optionen in Frage kommen.

5.1.2.3 Beitrag des Rollvorgangs

Abhängig vom Verfahren werden die Schallemissionen auf dem Rollweg nur durch die Triebwerke (AETO) oder erst durch die APU und zu einem späteren Zeitpunkt durch die Triebwerke (DT) verursacht. Die nachfolgend beschriebene Vorgehensweise ist für beide Schallquellen anwendbar. Es müssen lediglich die Oktavschalldruckpegel und ihre Bezugsentfernungen ausgetauscht werden.

Um das in Abschnitt 5.1 erwähnte Modell der Linienschallquelle für den Rollvorgang der Luftfahrzeuge anwenden zu können, wird ein Segmentierungsverfahren angewendet. Dieses basiert auf einer Zerlegung der Rollwege in lineare Segmente. Von jedem dieser Segmente trägt das Luftfahrzeug mit einem Beitrag E_i zur Schallexposition E an einem Immissionsort \mathbf{P} bei. Das Segmentierungsverfahren ist in Abbildung 5.4 dargestellt.

Der dreidimensionale Rollweg wird durch den Verlauf in der Horizontalebene sowie durch ein vertikales Höhenprofil (z -Koordinaten aus dem DGM) beschrieben. Die Zerlegung des Rollwegs erfolgt in zwei Schritten (siehe Abbildung 5.5) [17, S. 29f.]:

1. Der erste Schritt der Segmentierung ist die Zerlegung des Rollwegs. Bei der Berechnung werden alle im DES beschriebenen Rollwege berücksichtigt. Jeder Rollweg ist durch eine Folge von Abschnitten (Geraden und Kreisbögen)

⁵ D. Schmidt-Stiebitz (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten konventionelles Rollen“, E-Mail, Juni 2017.

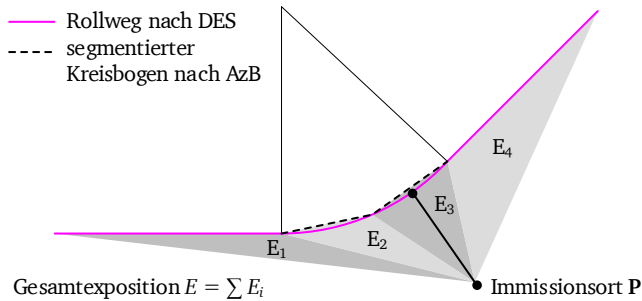


Abbildung 5.4.: Prinzip der Segmentierung eines Rollwegs. Das kreisbogenförmige Rollwegsegment wird in zwei lineare Teilsegmente zerlegt. [Eigene Darstellung nach [17, S. 6]]

dargestellt. Kreisbögen werden in Sehnenstücke mit Bogenwinkeln von maximal 15° unterteilt. Die Sehnenlänge darf 100 m nicht überschreiten. Dadurch ergibt sich eine Folge von geradlinigen Streckenteilabschnitten.

2. Das Höhenprofil des Rollwegs stellt ebenfalls eine Folge von linearen Teilstücken dar, die als Profilsegmente bezeichnet werden. Das Höhenprofil kann dem DGM entnommen werden. Im zweiten Schritt werden die Streckenteilabschnitte mit dem Höhenprofil verschnitten. Daraus resultiert eine Folge von Rollwegsegmenten.

Abhängig vom Immissionsort erfolgt eine weitere Unterteilung der Rollwegsegmente (siehe Abbildung 5.6). Beträgt die Länge eines Rollwegsegments mehr als $1/10$ des kürzesten Abstandes r_0 eines Immissionsortes P zum Rollwegsegment, so muss dieses Segment in Teilstücke unterteilt werden. Für den Fall $r_0 < 10$ m wird $r_0 = 10$ m gesetzt. Die Teilung erfolgt ausgehend von Punkt Q_0 auf der Basis des kürzesten Abstandes r_0 zum Rollwegsegment durch sukzessive Bildung von Teilstücken, die der Bedingung $l_i/r_i = 0,1$ genügen müssen. [17, S. 31] Anschließend wird jedes Teilstück durch eine Punktschallquelle Q_i in ihrem Mittelpunkt ersetzt.

Bei der Teilstückbildung sind zwei Fälle zu unterscheiden [17, S. 31f.]:

1. Es kann ein Lot mit dem Fußpunkt Q_0 von P auf das Rollwegsegment gefällt werden. In diesem Fall erfolgt die Teilstückbildung ausgehend vom Punkt Q_0 symmetrisch in Richtung auf die Segmentenden (symmetrische Teilstückbildung). Der Punkt Q_0 liegt in der Mitte des Teilstückes mit der Länge l_0 ;

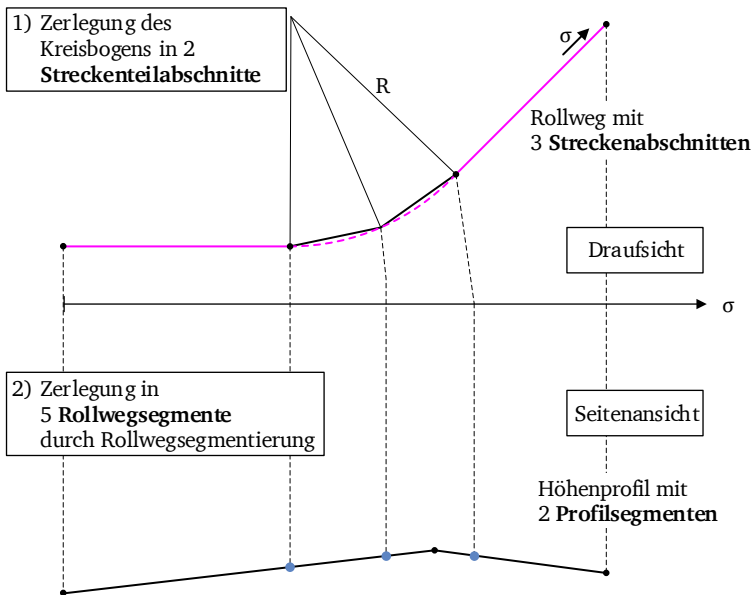


Abbildung 5.5.: Aufteilung des Rollwegs in Rollwegsegmente. [Eigene Darstellung nach [17, S. 30]]

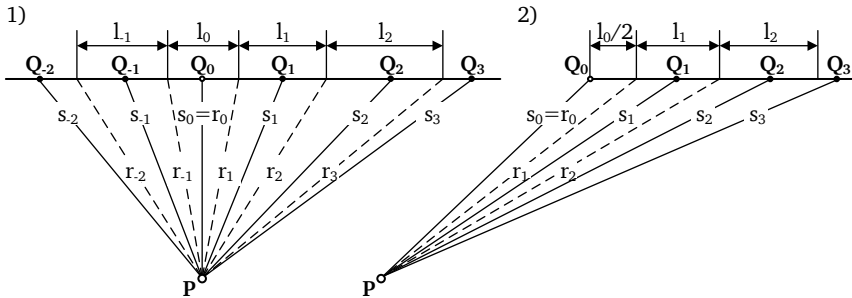


Abbildung 5.6.: Unterteilung eines Rollwegsegments in Teilstücke der Länge l_i . r_i ist der kleinste Abstand zwischen Teilstück und Immissionsort **P**, s_i ist der Abstand, der das Teilstück repräsentierenden Schallquelle zum Immissionsort **P**. [Eigene Darstellung nach [17, S. 32]]

2. Es kann *kein* Lot von **P** auf das Rollwegsegment gefällt werden. In diesem Fall erfolgt die Teilstückbildung ausgehend vom Punkt **Q**₀ in Richtung auf das Segmentende. Das erste Teilstück erhält die Länge $l_0/2$.

Jeder Punktschallquelle wird ein längenbezogener Schallleistungsexpositionspegel $L'_{W,E}$ zugeordnet. Für die jeweilige Luftfahrzeugklasse und das n -te Oktavband wird dieser nach folgender Gleichung berechnet [17, S. 32]:

$$L'_{W,E,n} = O_n - D_s(s_{On}) - D_{L,n}(s_{On}) - D_{\Omega,0} + D_V(V) + Z \text{ dB} \quad (5.7)$$

mit:

- O_n Oktavschalldruckpegel der Triebwerke bzw. APUs für eine Bezugsentfernung s_{On} ($s_{On} = 300 \text{ m}$ für Triebwerke, $s_{On} = 1 \text{ m}$ für APUs)
- n laufende Oktavbandnummer
- D_s Abstandsmaß nach Gleichung B.10, Anhang B.7
- $D_{L,n}$ Luftabsorptionsmaß für das n -te Oktavband nach Gleichung B.12, Anhang B.7
- $D_{\Omega,0}$ Raumwinkelmaß für Bezugsbedingungen ($D_{\Omega,0} = 3 \text{ dB}$)
- D_V Geschwindigkeitsmaß nach Gleichung B.24, Anhang B.8
- Z Zusatzpegel ($Z = -10 \text{ dB}$)

Der Pegel der längenbezogenen Schallleistungsexposition $L'_{W,E}$ nach Gleichung 5.7

ist auf eine Bezugslänge von 1 m normiert. Die durch Teilstücke repräsentierten Liniennquellen haben i. d. R. aber eine davon abweichende Länge. Einem solchen Teilstück i kann ein Schallleistungsexpositionspegel $L_{W,E,n,i}$ zugeordnet werden [17, S. 33]:

$$L_{W,E,n,i} = L'_{W,E,n,i} + 10 \cdot \lg\left(\frac{l_i}{l_0}\right) \text{ dB} \quad (5.8)$$

mit:

| | |
|----------------|---|
| $L'_{W,E,n,i}$ | Pegel der längenbezogenen Schallleistungsexposition des i -ten Teilstücks für das n -te Oktavband |
| l_i | Länge des i -ten Teilstücks |
| l_0 | Bezugslänge ($l_0 = 1 \text{ m}$) |

Der A-bewertete Schalldruckexpositionspegel $L_{p,A,E}$, der von einem einzelnen Luftfahrzeug an einem Immissionsort hervorgerufen wird, ergibt sich nach folgender Gleichung [17, S. 34]:

$$L_{p,A,E} = 10 \cdot \lg\left(\sum_{n=1}^8 10^{0,1 \cdot (L_{p,E,n} + A_n)}\right) \text{ dB} \quad (5.9)$$

unter Berücksichtigung der Schallpegelminderung auf dem Ausbreitungsweg:

$$L_{p,E,n} = L_{W,E,n} + D_{I,n} + D_s + D_{L,n} + D_{Z,n} + D_{\Omega} \text{ dB} \quad (5.10)$$

mit:

| | |
|-------------|---|
| $L_{W,E,n}$ | Schallleistungsexpositionspegel des Luftfahrzeugs für das n -te Oktavband |
|-------------|---|

Für die Bestimmung der Schallpegelminderung auf dem Ausbreitungsweg wird die Topografie des Geländes berücksichtigt. Die kumulative Geräuschbelastung durch alle Rollbewegungen innerhalb der 6 v. M. eines Jahres (180 Tage) wird durch den auf die Beurteilungszeit T_r bezogenen äquivalenten Dauerschallpegel $L_{p,A,eq,Roll,T_r}$ repräsentiert. Dieser ergibt sich durch einen dreifachen Summationsprozess [17, S. 41]:

1. Summation über alle Teilstücke eines Rollwegs N_{Ts}
2. Summation über alle Rollwege N_{Rw}
3. Summation über alle Luftfahrzeugklassen N_{Lk}

$$L_{p,A,eq,Roll,T_r} = 10 \cdot \lg \left(g_r \cdot \frac{T_0}{T_E} \sum_{k=1}^{N_{Lk}} \sum_{l=1}^{N_{Rw}} \sum_{m=1}^{N_{Ts}} n_{T_r,k,l} \cdot 10^{0,1 \cdot L_{p,A,E,k,l,m}(s_{k,l,m})} \right) \text{ dB} \quad (5.11)$$

mit:

| | |
|------------------------|--|
| $L_{p,A,E,k,l,m}$ | der von einer Bewegung der Luftfahrzeugklasse k auf dem Teilstück m des Rollwegs l am Immissionsort hervorgerufene Schall-expositionspegel in dB |
| $n_{T_r,k,l}$ | Anzahl der Rollbewegungen der Luftfahrzeugklasse k auf dem Rollweg l während der Beurteilungszeit T_r innerhalb der Erhebungszeit T_E |
| $s_{k,l,m}$ | Entfernung des Luftfahrzeugs der Klasse k auf dem Teilstück m des Rollwegs l vom Immissionsort |
| $k = 1, \dots, N_{Lk}$ | laufender Index über die Luftfahrzeugklassen |
| $l = 1, \dots, N_{Rw}$ | laufender Index über die Rollwege |
| $m = 1, \dots, N_{Ts}$ | laufender Index der Teilstücke auf einem Rollweg |

5.1.3 Modellbildung

Nachdem die Berechnungsmethode vorgestellt wurde, wird in diesem Unterabschnitt die Modellierung der Schallquellen erläutert.

5.1.3.1 Rollgeschwindigkeiten

Die AzB gibt eine Rollgeschwindigkeit von 15 m/s auf allen Rollwegsegmenten vor [17, S. 27f.]. Für eine genauere Abbildung der Realität werden jedoch auf verschiedenen Streckenabschnitten der Rollwege unterschiedliche Rollgeschwindigkeiten modelliert. Im Bereich der Abstellpositionen wird eine Geschwindigkeit von 15 kn angenommen und in Kurven 18 kn⁶ (Kurven mit einer Richtungsänderung von $\geq 80^\circ$ 10 kn [4]). Auf geraden Streckenabschnitten wird zwischen DT und AETO unterschieden. Während der TaxiBot eine Maximalgeschwindigkeit von 22 kn erreicht, gibt es beim AETO keine Geschwindigkeitsbeschränkung. Hier wird daher eine höhere Geschwindigkeit von 29,15 kn angenommen. Dies entspricht der in der AzB vorgegebenen Geschwindigkeit von 15 m/s [17, S. 27f.]. Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgänge werden nicht modelliert.

⁶ S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Experteninterview“, Persönliches Gespräch, April 2017.

5.1.3.2 APU-Klassen

Die AzB [17] unterscheidet lediglich zwei APU-Klassen, die den verschiedenen Luftfahrzeugklassen zugeordnet werden. In einer Untersuchung von Reil [76] wurden am Flughafen Frankfurt Schalldruckpegelmessungen an APUs durchgeführt und daraus die Oktavschalldruckpegel der einzelnen Luftfahrzeugklassen berechnet. Somit stehen Emissionsdaten von insgesamt 8 Luftfahrzeugklassen zur Verfügung. Die Oktavschalldruckpegel der APU-Klassen sind im Anhang C.6, Tabelle C.7, zu finden. Die Höhen der Schallquellen sind in Tabelle C.8 aufgeführt.

5.1.3.3 Für das operationelle Schleppen geeignete Luftfahrzeugtypen

Die Luftfahrzeugtypen, die vom Narrow- bzw. Wide-Body TaxiBot bedient werden können, sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst. Hier wird auch eine Zuordnung zur entsprechenden Luftfahrzeuggruppe nach AzB [17] vorgenommen.

Tabelle 5.1.: Übersicht über die vom TaxiBot abfertigten Luftfahrzeugtypen nach [14].

| TaxiBot | Luftfahrzeugtyp | Luftfahrzeuggruppe |
|-------------|--|--------------------|
| Narrow-Body | A318, A319, A320, A321, B733, B734, B735, B736, B737, B738, B739, B752 | S 5.2 |
| | B753 | S 6.1 |
| Wide-Body | A332, A333, A359, B762, B763, B764, B772, B773, B77L, B77W, B788 | S 6.1 |
| | A342, A343, A345, A346 | S 6.3 |
| | B742, B744, B748 | S 7 |
| | A388 | S 8 |

5.1.3.4 Ermittlung der Kapazität der Abkoppelpositionen

Die Abkoppelpositionen befinden sich in der Nähe des Startbahnkopfes und sind idealerweise so gelegen, dass konventionell rollende Luftfahrzeuge nicht behindert

werden. Geeignet sind hierfür i. d. R. parallele Rollwege. Zudem muss sich in unmittelbarer Nähe eine Fahrstraße befinden, auf der der TaxiBot zurückfahren kann. Der auf der Abkoppelposition zur Verfügung stehende Platz ist ein limitierender Faktor für das operationelle Schleppverfahren.

Für die Analyse der Kapazität der Abkoppelpositionen reichen die Angaben im DES nicht aus, da hieraus lediglich die Streckenbelegung und nicht die Dauer der Rollvorgänge hervorgeht. Aus diesem Grund wird für diese Untersuchung eine sog. Movement Table verwendet, die jede einzelne Flugbewegung eines Jahres auflistet. Die Tabelle enthält zusätzliche Informationen, wie die Actual Time of Departure⁷ (ATD), Off-Block Time⁸ (OFB), Departure Queuing Time⁹ (DQT), Luftfahrzeuggruppen nach AzB, Startbahnen und Positionsbereiche. Eine Übersicht über die verschiedenen Zeiten sowie den DT-Vorgang gibt Abbildung 5.7. Bevor die Kapazität der Abkoppelpositionen untersucht werden kann, müssen die Daten der Movement Table aufbereitet werden. Die dazu notwendigen Schritte sind im Anhang C.7, Abbildung C.2, aufgezeigt.

Die Kapazität der Abkoppelposition hängt vom Zeitpunkt des Triebwerkstarts ab. Werden die Triebwerke auf der Abkoppelposition gestartet, so lässt sich der Blockierungszeitraum der Abkoppelposition folgendermaßen berechnen:

Wenn die Wartezeit vor dem Line-up ausreicht, damit die Triebwerke warmlaufen können und somit gilt $\Delta t_{\text{TW-Warmlaufen}} \leq \Delta t_{\text{DQT}} - \Delta t_{\text{ALUT}}$:

$$t_{\text{Pos_blockiert_von}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{DQT}} - (\Delta t_{\text{PCM/DCM}} + \Delta t_{\text{TW-Start}} + \Delta t_{\text{Checks}}) \quad (5.12)$$

$$t_{\text{Pos_blockiert_bis}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{DQT}} \quad (5.13)$$

Wenn die Wartezeit nicht dafür ausreicht, dass die Triebwerke währenddessen warmlaufen ($\Delta t_{\text{TW-Warmlaufen}} > \Delta t_{\text{DQT}} - \Delta t_{\text{ALUT}}$), muss eine entsprechende Zeitdauer auf der Abkoppelposition gewartet werden. Es wird angenommen, dass der

⁷ Die Actual Time of Departure (ATD) kennzeichnet den Zeitpunkt, an dem das Luftfahrzeug anfängt auf der Startbahn zu beschleunigen [4].

⁸ Die Off-Block Time (OFB) ist der Zeitpunkt, zu dem der Vorfeldlotse die Freigabe zum Pushback erteilt [4].

⁹ Die Departure Queuing Time (DQT) ist die Zeitdauer, die ein Luftfahrzeug mit Warten vor dem Startbahnkopf verbringt. Dabei wird eine Rollgeschwindigkeit von 3,5 m/s unterschritten. Die DQT enthält die sog. Actual Line-up Time (ALUT). Das Line-up beginnt zu dem Zeitpunkt, wenn das Luftfahrzeug die CAT-I Haltelinie vor der Startbahn überrollt (90 m von der Startbahnmitte entfernt). Um eine Freigabe zum Überschreiten der Haltelinie zu bekommen, müssen die Triebwerke bereits warmgelaufen und das Luftfahrzeug bereit zum Starten sein. [4]

Pilot im optimalen Fall die Wartezeit kennt und das Warmlaufen der Triebwerke damit abstimmt. Die Abkoppelposition ist dann in folgendem Zeitraum blockiert:

$$t_{\text{Pos_blockiert_von}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{ALUT}} - \left(\Delta t_{\text{PCM/DCM}} + \Delta t_{\text{TW-Start}} + \Delta t_{\text{Checks}} + \Delta t_{\text{TW-Warmlaufen}} \right) \quad (5.14)$$

$$t_{\text{Pos_blockiert_bis}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{DQT}} \quad (5.15)$$

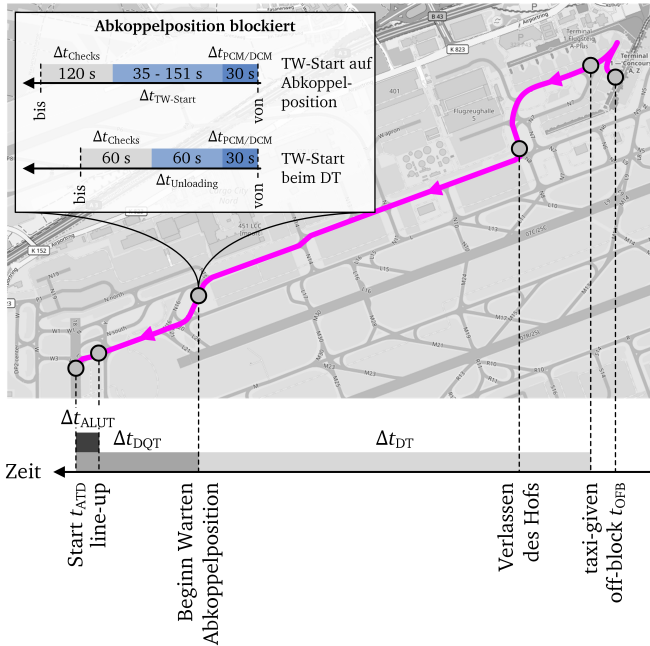


Abbildung 5.7.: Prozesszeiten und DT-Vorgang. Kapazitätsbetrachtung der Abkoppelposition. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

Die ALUT wurde in einer Untersuchung der Fraport AG für verschiedene Kombinationen von Parkpositionen und Startbahnen untersucht [4]. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird der arithmetische Mittelwert $\overline{ALUT} = 91,7 \text{ s}$ ($SD = 23,9 \text{ s}$) verwendet. Für den Wechsel vom PCM in den DCM werden 30 s veranschlagt¹⁰.

¹⁰ S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten Dispatch Towing“, E-Mail, Juni 2017.

Werte für die Dauer des Triebwerkstarts sowie für das Warmlaufen der Triebwerke sind Anhang C.5, Tabelle C.6, zu entnehmen. Die Triebwerke werden während des Abladens (Unloading) vom TaxiBot gestartet. Für die Dauer der Checks, nachdem die Triebwerke hochgefahren wurden, werden 120 s angenommen. Dies beinhaltet das Abarbeiten einer After Start Checkliste, den Flight Control Check sowie den ersten Teil des Before Take-off Checks¹¹.

Erfolgt das Hochfahren der Triebwerke beim DT, so gilt für den Blockierungszeitraum der Abkoppelpositionen Folgendes:

$$t_{\text{Pos_blockiert_von}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{DQT}} - (\Delta t_{\text{PCM/DCM}} + \Delta t_{\text{Unloading}} + \Delta t_{\text{Checks}}) \quad (5.16)$$

$$t_{\text{Pos_blockiert_bis}} = t_{\text{ATD}} - \Delta t_{\text{DQT}} \quad (5.17)$$

Da in diesem Fall der Zeitraum für den Triebwerkstart auf der Abkoppelposition entfällt, wird die Dauer des Unloadings berücksichtigt (60 s)¹². Zudem kann das Abarbeiten der After Start Checkliste beim DT erfolgen. Damit reduziert sich Δt_{Checks} in Gleichung 5.16 auf 60 s¹³. Mit Verlassen der Abkoppelposition ist in allen Fällen das Warmlaufen der Triebwerke abgeschlossen.

Nachdem für jede Flugbewegung der Movement Table berechnet wurde, von wann bis wann die Abkoppelposition beim DT blockiert wäre, werden die Rollvorgänge bestimmt, für die eine Abkoppelposition frei ist und die dementsprechend mit dem TaxiBot abgefertigt werden können. Dazu wird angenommen, dass der erste Flug eines Tages immer getaxibottet werden kann. Danach prüft der Algorithmus, ob für den nachfolgenden Flug die Position noch blockiert ist. Ist das der Fall, so wird dieser Flug entfernt und der nächste Flug geprüft. Auf diese Weise werden für jeden Tag die Flüge ermittelt, für die eine Abkoppelposition zur Verfügung steht. Daraus werden die prozentualen Anteile je Luftfahrzeugklasse für die 6 v. M. berechnet.

5.1.4 Ausgangsgröße

Die für die Punkte des Rechengitters bestimmten Werte des äquivalenten Dauerschallpegels bilden die Grundlage zur Berechnung des Beurteilungspegels $L_{\text{dn,Boden}}$. Für die Darstellung der Ergebnisse werden Punkte mit $L_{\text{dn,Boden}} = \text{const.}$ durch lineare Interpolation zwischen den horizontal und vertikal benachbarten Gitterpunkten ermittelt. Diese Punkte werden als Kurvenpunkte bezeichnet und ohne Glättungsverfahren zu einer Isolinie verbunden. [17, S. 45]

¹¹ S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten Dispatch Towing“, E-Mail, Juni 2017.

¹² S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten Dispatch Towing“, E-Mail, Juni 2017.

¹³ S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Prozesszeiten Dispatch Towing“, E-Mail, Juni 2017.

Bei der Berechnung der Isolinien kann es zu Besonderheiten kommen. So können beispielsweise sog. Enklaven und Exklaven auftreten. Unter einer Enklave wird ein von einer Isolinie eingeschlossenes Gebiet verstanden, für das ein äquivalenter Dauerschallpegel berechnet wurde, der kleiner als der Wert der zugehörigen Isolinie ist. [17, S. 45] Exklaven sind dagegen vergleichbare Gebiete außerhalb einer Isolinie. Das Berechnungsprogramm geht damit wie folgt um:

1. Enklaven, deren Flächeninhalt nicht mehr als 1.000 m^2 beträgt, werden bei der Berechnung in die sie umgebende Isolinie einbezogen. Exklaven, die kleiner als 1.000 m^2 sind, werden nicht berücksichtigt.
2. Enklaven und Exklaven, deren Flächeninhalt mehr als 1.000 m^2 beträgt, werden als separate Isolinien behandelt.

5.2 Verifikation des Berechnungsprogramms

Ziel der Verifikation und Validierung ist die Bestätigung der Glaubwürdigkeit eines Modells („Credibility“) [77, S. 2]. Die VDI-Richtlinie 3633 [78, S. 36] definiert die Verifikation als „Durchführung von formalen Prüfungen zur Korrektheit des Simulationsmodells“. Der Vorgang der Verifikation ist also die Überprüfung, ob ein Modell von einer Beschreibungsart (konzeptionelles Modell) in eine andere Beschreibungsart (analytisches Modell) korrekt transformiert wurde (siehe Abbildung 5.8) [77, S. 14]. Der vollständige Korrektheitsnachweis (Fehlerfreiheit) ist im besten Fall sehr aufwendig und in den meisten Fällen nach heutigem Stand der Technik nicht möglich (vgl. [79]). Daher wird die Verifikation oft auf die Überprüfung des Programmcodes beschränkt [77, S. 15].

Die AzB [17] stellt in ihrer vollständigen Form ein Regelwerk zur Ermittlung von Lärmschutzbereichen dar. Da die Festsetzung der Lärmschutzbereiche erhebli-

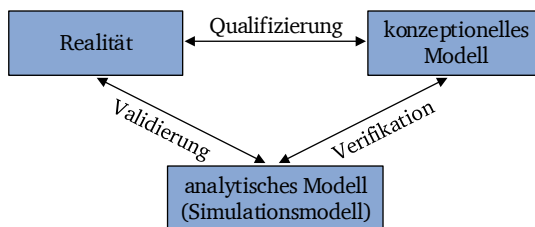


Abbildung 5.8.: Verifikation und Validierung in der Modellierung und Simulation. [Eigene Darstellung nach [80]]

che rechtliche und finanzielle Konsequenzen nach sich zieht, ist eine qualitätsgesicherte Umsetzung des AzB-Berechnungsprogramms von erheblichem Interesse. Aus diesem Grund wurde das Umweltbundesamt (UBA) gebeten bei der Qualitätssicherung zu unterstützen. In Zusammenarbeit mit dem Niedersächsischen Ministerium für Umwelt und Klimaschutz und dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurde ein Verfahren zur Überprüfung von AzB-Berechnungsprogrammen entwickelt und im Internet zur Verfügung gestellt (vgl. [81]).

Mithilfe eines fiktiven Testflugplatzes können anhand von Grundszenarien verschiedene Bestandteile des Berechnungsprogramms überprüft werden. Zu diesem Zweck gibt es folgende Unterlagen:

- DES des Testflugplatzes
- Koordinaten eines Flugplatzgebäudes innerhalb des Testflugplatzes
- Koordinaten von drei zu berechnenden Einzelpunkten für jedes Grundszenario
- Daten einer ausschließlich zu Testzwecken eingeführten Luftfahrzeugklasse „S 4 X – L“

Die Informationen aus den Unterlagen sind in Abbildung 5.9 in einer Darstellung des UBA-Testflugplatzes zusammengeführt. Da in der vorliegenden Arbeit ausschließlich Abrollvorgänge und APU-Operationen eine Rolle spielen, werden lediglich das Grundszenario 1 „Alle Abflug-Rollwege“ und das Grundszenario 3 „Alle APU-Positionen“ untersucht. Alle anderen Grundszenarien sowie das Gesamtszenario finden keine Berücksichtigung, da hier zusätzlich An- und Abflüge sowie Platzrunden in die Berechnung eingehen.

Für jedes Grundszenario ist an drei vorgegebenen Immissionspunkten (IP) eine Einzelpunktberechnung durchzuführen (Szenario 1: IP8, IP10, IP11; Szenario 3: IP7, IP11, IP14). Dabei sind die äquivalenten Dauerschallpegel für den Tag ($L_{p,A,eq,Tag}$) zu berechnen. Mit dem Szenario „Alle APU-Positionen“ werden vor allem Fehler in der Ausbreitungsrechnung festgestellt bzw. ausgeschlossen, da es sich hier um stehende Punktquellen handelt. Mithilfe des Szenarios „Alle Abflug-Rollwege“ hingegen, wird vor allem die Korrektheit der Rollwegsegmentierung, der Teilstückbildung und der Erzeugung von Quellpunkten überprüft. Die Ergebnisse der Berechnungen sowie die Referenzwerte sind in Tabelle 5.2 und Tabelle 5.3 zusammengefasst. Gemäß dem Verfahren zur Überprüfung von AzB-Berechnungsprogrammen [81] wird ein Berechnungsergebnis als korrekt gewertet, wenn es nicht mehr 0,1 dB vom Referenzwert abweicht. Die erzielten Ergebnisse zeigen somit eine sehr gute Übereinstimmung und das implementierte Berech-

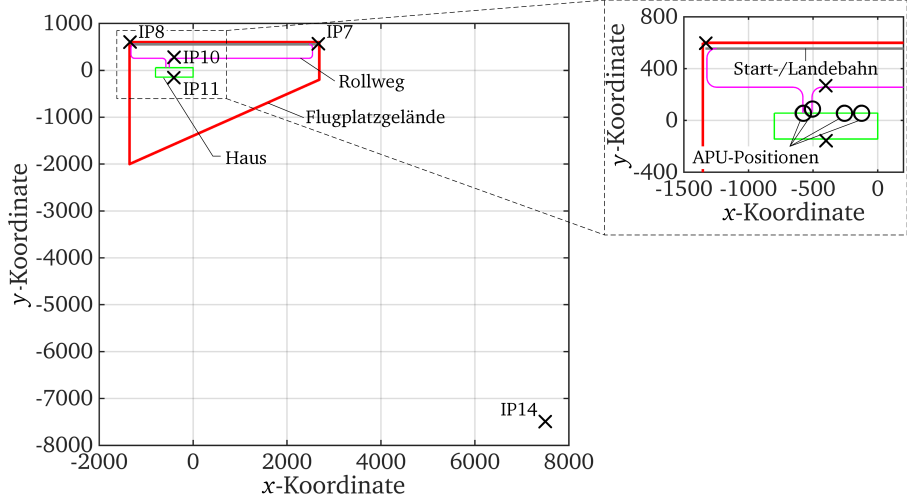


Abbildung 5.9.: Darstellung des UBA-Testflugplatzes, der Immissionspunkte (IP), der APU-Positionen sowie der Rollwege.

nungsprogramm kann als Grundlage für die Untersuchung der Vergleichsszenarien angewendet werden.

Zusätzlich zu den Berechnungen wurde anhand von graphischen Darstellungen die Plausibilität der Segmentierung der Rollwege und der Generierung von Teilstücken sowie der Erzeugung von Punktschallquellen überprüft.

Tabelle 5.2.: Berechnungsergebnisse Grundszenario 1 in dB(A). Vergleich mit UBA-Referenzwerten.

| Grundszenario 1 | | | |
|-----------------------|----------------------|------------------|------------------|
| Flugbetriebssituation | Alle Abflug-Rollwege | | |
| Immissionspunkt | 8 | 10 | 11 |
| | $L_{p,A,eq,Tag}$ | $L_{p,A,eq,Tag}$ | $L_{p,A,eq,Tag}$ |
| Referenz | 62,74 | 76,98 | 51,09 |
| Berechnungsergebnis | 62,74 | 76,96 | 51,09 |
| Differenz | 0,00 | 0,02 | 0,00 |

Tabelle 5.3.: Berechnungsergebnisse Grundszenario 3 in dB(A). Vergleich mit UBA-Referenzwerten.

| Grundszenario 3 | | | |
|-----------------------|---------------------|------------------|------------------|
| Flugbetriebssituation | Alle APU-Positionen | | |
| Immissionspunkt | 7 | 11 | 14 |
| | $L_{p,A,eq,Tag}$ | $L_{p,A,eq,Tag}$ | $L_{p,A,eq,Tag}$ |
| Referenz | 34,02 | 66,20 | 16,15 |
| Berechnungsergebnis | 34,01 | 66,20 | 16,19 |
| Differenz | 0,01 | 0,00 | -0,04 |

5.3 Exemplarische Untersuchung der Abrollvorgänge am Flughafen Frankfurt

Die Untersuchung der Auswirkungen des operationellen Schleppens auf den Immissionsschalldruckpegel erfolgt am Beispiel des Flughafens Frankfurt. Es werden verschiedene Vergleichsszenarien definiert, die anschließend implementiert und berechnet werden. Im Anschluss werden die Ergebnisse dargestellt und diskutiert.

5.3.1 Beschreibung der Vergleichsszenarien

VDI-Richtlinie 3780 [82] benennt verschiedene Methoden zur Bewertung von Technologien. Um die akustischen Auswirkungen des operationellen Schleppens zu untersuchen, wird in dieser Arbeit die Methode *Szenario-Gestaltung* ausgewählt und angewendet. In der Literatur wird das *Szenario* oft als eine Darstellung einer möglichen, zukünftigen Situation, also einem Zukunftsbild, definiert. Es beinhaltet ebenfalls die Entwicklungspfade, die zu der zukünftigen Situation führen und bildet nur einen Teil der Zukunft ab. [83, 84] Zudem ist ein Szenario hypothetisch, hat somit keinen Wahrheitsanspruch und basiert auf Annahmen darüber, ob und wie Entwicklungen verlaufen könnten [85].

Nach von Reibnitz [83] werden drei Szenariotypen unterschieden (siehe Abbildung 5.10): Positives Extremszenario (bestmögliche, zukünftige Entwicklung), negatives Extremszenario (schlechtmöglichste, zukünftige Entwicklung) und Trendszenario (Fortschreibung der heutigen Situation in die Zukunft). Zwischen den beiden Extremen existieren verschiedenste Ausprägungen der Gegenwart (Szenario S1, Szenario S2 etc.) [85].

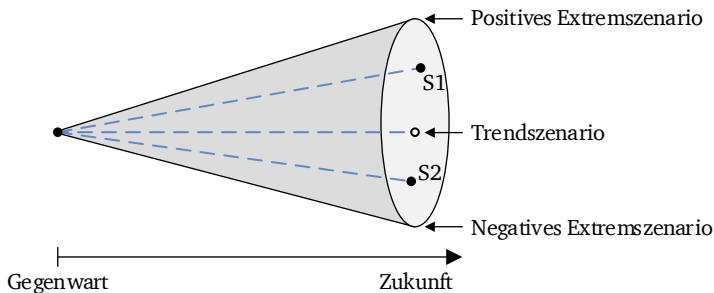


Abbildung 5.10.: Szenariotrichter und mögliche Szenariotypen. [Eigene Darstellung nach [86, S. 119]]

Die in dieser Arbeit zu untersuchenden Vergleichsszenarien sind in Abbildung 5.11 veranschaulicht. Das Referenzszenario stellt das *All-Engine Taxi-out* dar. Dies entspricht dem Trendszenario in Abbildung 5.10. Im Gegensatz zu den Vorgaben der AzB [17] wird dieses Szenario jedoch mit realistischeren Rollgeschwindigkeiten modelliert und jeder Luftfahrzeugklasse eine eigene APU-Klasse zugeordnet. Zudem wird das Starten der Triebwerke auf der Abstellposition berücksichtigt. Die AzB [17] hingegen gibt lediglich eine Rollgeschwindigkeit von 15 m/s auf allen Rollwegabschnitten vor und unterscheidet zwischen zwei APU-Klassen. Um einen Vergleich zum Referenzszenario zu ziehen, werden die Schallimmissionen der Taxi-out Bewegungen auch nach AzB (jeweils mit und ohne Berücksichtigung des Triebwerkstarts) berechnet. Das Szenario *Dispatch Towing* wird in vier unterschiedlichen Ausprägungen untersucht. Auch hier wird die Rollgeschwindigkeit je nach Streckenabschnitt angepasst und detailliertere APU-Klassen verwendet. Das DT wird ohne (Szenario 1) und mit (Szenario 2) Kapazitätsbetrachtung der Abkoppelpositionen untersucht. Hierbei wird jeweils zwischen einem Triebwerkstart auf der Abkoppelposition (Szenario 1a und 2a) und einem Triebwerkstart während des DT (Szenario 1b und 2b) unterschieden (vgl. Abschnitt 2.2). Insgesamt werden sieben Berechnungsdurchläufe vorgenommen.

Die Untersuchung der Vergleichsszenarien erfolgt anhand der Flugbewegungsdaten der 6 v. M. des Jahres 2014. Diese wurden von der Fraport AG zur Verfügung gestellt¹⁴. Für die Ableitung der Szenarien wird die Anzahl der Flugbewegungen konstant gehalten und auf eine Prognose der Entwicklung der Flugbewegungen verzichtet.

¹⁴ Fraport AG, „Beschreibung von Rollwegen, Streckenbelegung und APU-Auswertung“, E-Mail, Juni 2017.

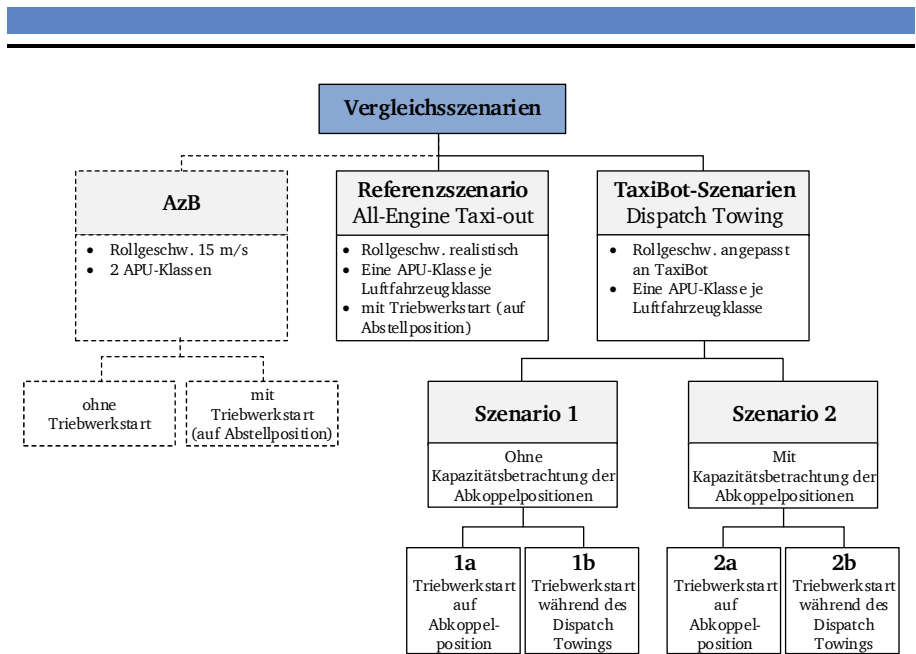


Abbildung 5.11.: Übersicht der zu untersuchenden Szenarien. [Eigene Darstellung]

5.3.2 Implementierung der Schallimmissionsberechnung für den Flughafen Frankfurt

Im Folgenden wird die Implementierung des Programms zur Schallimmissionsberechnung für das Fallbeispiel Flughafen Frankfurt beschrieben.

5.3.2.1 Rechengitter

Die Koordinaten des Rechengitters werden aus einem von der Fraport AG zur Verfügung gestellten Topografiegitter erzeugt¹⁵. Aus der Größe des Untersuchungsgebietes von 9.600 m x 7.200 m ergeben sich 193 Rasterpunkte im Rechtswert (x-Koordinate) und 145 Rasterpunkte im Hochwert (y-Koordinate) und damit ein Gesamtumfang von 27.985 Rasterpunkten. Da das Topografiegitter in einer Auflösung von 10 m vorliegt, wird davon jeder fünfte Wert extrahiert.

¹⁵ Fraport AG, „Topografie Flughafen Frankfurt am Main“, E-Mail, August 2016.

5.3.2.2 Topografie des Flughafens Frankfurt

Neben dem Rechts- und Hochwert liegt hier auch die Höhe des Geländes vor. Die Daten zur Topografie wurden als Digitales Geländemodell (DGM) mit einer Gitterweite von 10 m (DGM10) bereitgestellt. Abbildung 5.12 zeigt die Topografie des Flughafens Frankfurt und seiner Umgebung. Das Höhenprofil des Flughafengeländes weist keine Sprünge auf. Es steigt jedoch von Westen nach Osten von ca. 100 m auf 110 m graduell an.

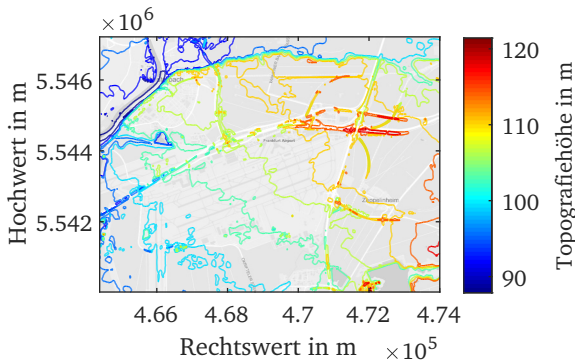


Abbildung 5.12.: Topografie des Flughafens Frankfurt und Umgebung. Ausdehnung entspricht der Größe des Rechengitters. [Hintergrundkarte © Mapbox]

5.3.2.3 Abstellpositionen der Luftfahrzeuge am Flughafen Frankfurt

Die insgesamt 271 Abstellpositionen am Flughafen Frankfurt sind in Abbildung 5.13 dargestellt. Da die Koordinaten der Abstellpositionen zunächst in zweidimensionaler Form vorliegen, wird die entsprechende Höhe aus dem Topografieraster ermittelt. Die Werte werden nicht interpoliert, sondern die Höhe des nächstgelegenen Rasterpunkts zugeordnet. Bei einer Auflösung des DGM von 10 m beträgt die größtmögliche Abweichung des horizontalen Abstands 7,1 m. Nämlich genau dann, wenn sich eine Abstellposition in der Mitte einer von vier DGM-Punkten aufgespannten Gitterzelle befindet. Diese Abweichung ist jedoch vertretbar, da die Höhenunterschiede auf dem Flughafengelände nicht groß sind.

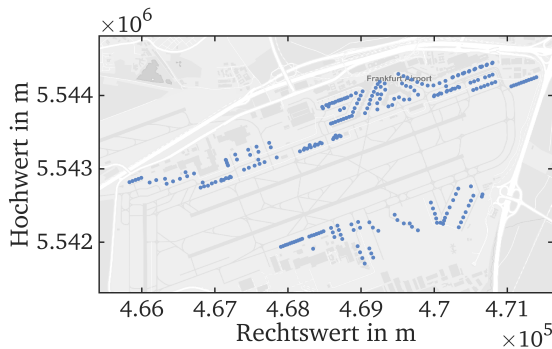


Abbildung 5.13.: Abstellpositionen der Luftfahrzeuge am Flughafen Frankfurt (271 Positionen). [Hintergrundkarte © Mapbox]

5.3.2.4 Startbahnen und Rollwege am Flughafen Frankfurt

Da ein Rollweg vom Startpunkt auf der Startbahn bis zur Abstellposition beschrieben wird, würde am Flughafen Frankfurt mit seinen 271 Abstellpositionen und fünf Startbahnen eine große Datenmenge zusammenkommen. Um diese Datenmenge zu reduzieren, werden benachbarte Abstellpositionen zu insgesamt 20 Ersatz-Abstellpositionen (Positionsbereiche) zusammengefasst. Anstatt die Rollwege dann bis zu jeder einzelnen Abstellposition zu definieren, endet der Rollweg in dem jeweiligen Positionsbereich. Eine Übersicht der Positionsbereiche sowie Startpunkte der Abflug-Rollwege gibt Abbildung 5.14.

Insgesamt sind im DES des Flughafens Frankfurt 240 Rollwege aufgeführt, die von folgenden Startpunkten aus definiert sind:

- 07C / 07C(L17) (40 Rollwege)
- 07R (20 Rollwege)
- 25L (20 Rollwege)
- 25C / 25C(L6) (40 Rollwege)
- 18N (Taxiway N) / 18C (Taxiway M) / 18S (Taxiway S) (120 Rollwege, da hier zusätzlich nach West- und Ost-Betrieb unterschieden wird)

Die Bahn 07L / 25R wird nicht berücksichtigt, da sie fast ausschließlich für Landeanflüge genutzt wird.

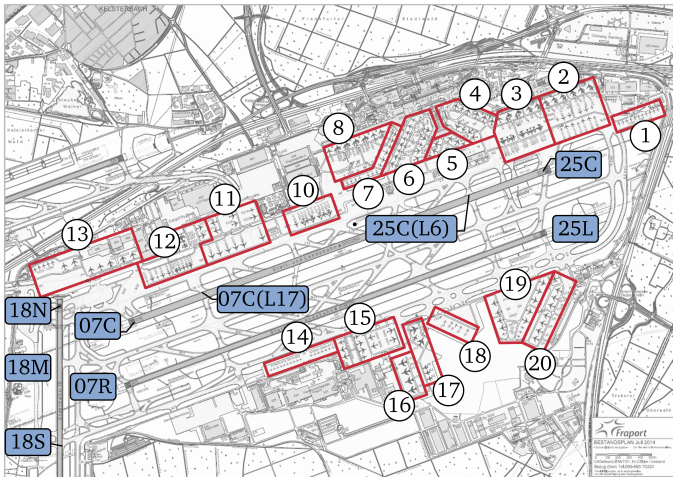


Abbildung 5.14.: Übersicht Positionsbereiche P1 bis P20 und Startpunkte der Abflug-Rollwege. [Hintergrundkarte: Fraport Bestandsplan 2014]

5.3.2.5 Streckenbelegung am Flughafen Frankfurt

Im DES ist für jeden einzelnen Rollweg sowie für jede Luftfahrzeuggruppe eine Streckenbelegung angegeben. Tabelle 5.4 enthält eine Aufteilung der Abrollbewegungen auf die Luftfahrzeuggruppen für die 6 v. M. 2014 am Flughafen Frankfurt. Es wurde bereits über alle Rollwege summiert.

5.3.2.6 Abkoppelpositionen am Flughafen Frankfurt

Die Abkoppelpositionen am Flughafen Frankfurt sind in Abbildung 5.15 grafisch dargestellt. Welche der Positionen genutzt werden kann, ist abhängig von der Betriebsrichtung am Flughafen. Bei Westbetrieb kann die Abkoppelposition N15 für die Startbahn 18N genutzt werden. Die Abkoppelposition L-North kommt dann für Flüge zum Einsatz, die auf der 25C abfliegen. Die Abkoppelposition Sierra Beam Yankee wird für Flugzeuge genutzt, die im Süden über den Rollweg Sierra auf die Startbahn 18S auffahren. Bei Ostbetrieb dient N-North als Abkoppelposition für die Startbahn 18N. Die Startbahn 07C kann über die Abkoppelposition N15 vom TaxiBot bedient werden. Für Abflüge von der Startbahn 18S kann auch bei Ostbetrieb die Abkoppelposition Sierra Beam Yankee genutzt werden. Die südliche Parallelbahn 07R/25L wird nicht für das DT genutzt, da hier keine Abkoppelo-

Tabelle 5.4.: Aufteilung der Abrollbewegungen auf die Luftfahrzeuggruppen für die 6 v. M. 2014 am Flughafen Frankfurt (Tag und Nacht).

| Luftfahrzeuggruppe | Abrollbewegungen |
|--------------------|------------------|
| P 1.3 | 6 |
| P 1.4 | 111 |
| P 2.1 | 1.785 |
| S 5.1 | 11.567 |
| S 5.2 | 85.345 |
| S 5.3 | 98 |
| S 6.1 | 14.765 |
| S 6.2 | 1.334 |
| S 6.3 | 3.213 |
| S 7 | 6.818 |
| S 8 | 2.059 |

sitionen zur Verfügung stehen. Zudem wird diese aktuell vorrangig für landende Luftfahrzeuge genutzt. Nur 0,3 % aller Starts gingen in den 6 v. M. 2014 von hier aus.

5.3.2.7 Anzahl der operationellen Schleppvorgänge

Zur Berechnung der Luftfahrzeuganzahl, die mit dem TaxiBot abgefertigt werden können (vgl. Unterabschnitt 5.1.3), muss zunächst betrachtet werden, unter welchen Bedingungen ein Einsatz des TaxiBots möglich ist. Der Einsatz des TaxiBots lohnt sich erst ab einer gewissen Entfernung der Parkposition von der Startbahn (die Menge des eingesparten Kerosins muss dem dabei erforderlichen Zusatzaufwand günstig gegenüberstehen). Diese Positionen wurden von der Lufthansa LEOS ermittelt und in dieser Arbeit übernommen¹⁶. Für Abflüge auf den Startbahnen 18N und 07C kommen die Positionsbereiche P1 bis P8 in Frage. Bei der Startbahn 25C sind es die Positionsbereiche P6 bis P13 und bei Auffahrten auf die Startbahn 18S können alle Positionsbereiche berücksichtigt werden. Eine Übersicht der Positionsbereiche wurde in Abbildung 5.14 gezeigt.

Das Szenario *Dispatch Towing* wird in zwei Ausprägungen untersucht: mit und ohne Kapazitätsberücksichtigung der Abkoppelpositionen (Szenario 1 und Szenario 2).

¹⁶ S. Meyenburg (Lufthansa LEOS), „Experteninterview“, Persönliches Gespräch, April 2017.

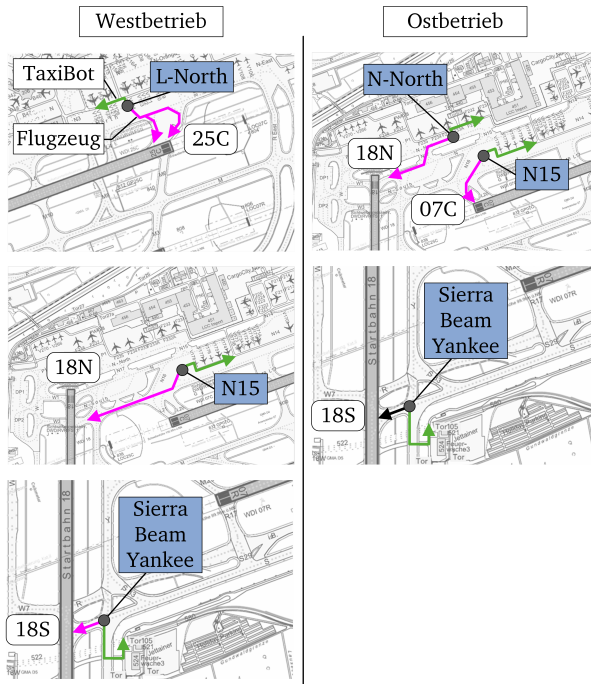


Abbildung 5.15.: Abkoppelpositionen für das DT bei West- und Ostbetrieb des Flughafens Frankfurt. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte: Fraport Bestandsplan 2014]

rio 2, vgl. Abbildung 5.11). Wird die Kapazität der Abkoppelpositionen außer Acht gelassen, so werden bei der Berechnung der Anzahl der mittels TaxiBot abfertigen Luftfahrzeuge alle technisch möglichen Luftfahrzeugtypen und zulässigen Kombinationen von Positionsbereichen und Startbahnen berücksichtigt. Dies ergibt die maximal mögliche Anzahl an DT-Vorgängen. Die Anzahl ist unabhängig davon, ob der Triebwerkstart vorher oder erst auf der Abkoppelposition erfolgt.

Abbildung 5.16 zeigt eine Analyse der Taxi-out Vorgänge für die 6 v. M. des Jahres 2014. Dabei wird zwischen AETO-Vorgängen und Vorgängen unterschieden, die vom TaxiBot abgefertigt werden können. Es wird eine Unterteilung nach Startbahnen und Szenarien vorgenommen. In dem betrachteten Zeitraum gab es insgesamt 127.101 Taxi-out Vorgänge. Von diesen Vorgängen könnten etwa 54% vom Ta-

xiBot abgefertigt werden, wenn Kapazitätsengpässe auf den Abkoppelpositionen nicht betrachtet werden.

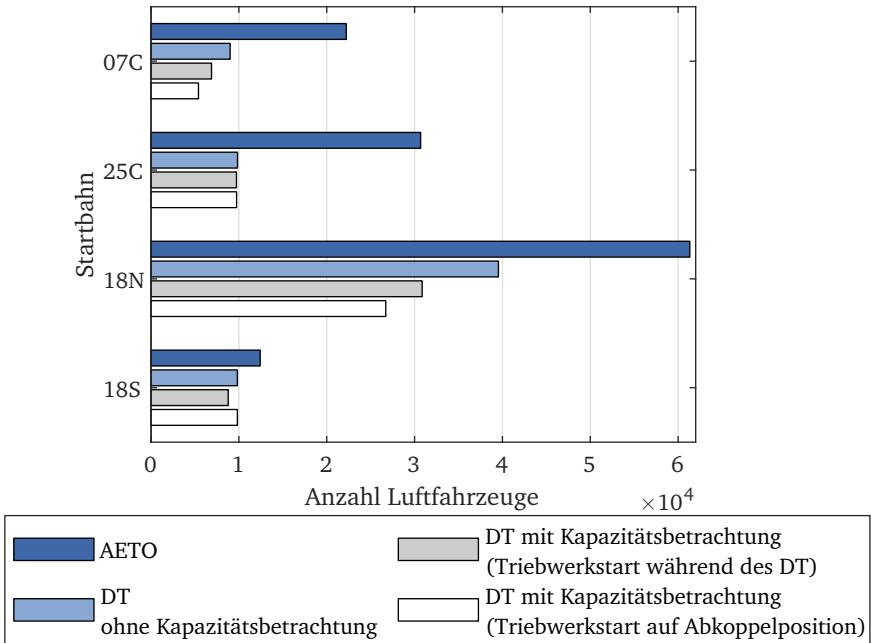


Abbildung 5.16.: Anzahl der Luftfahrzeuge unterteilt nach Startbahnen auf Grundlage der Flugbewegungszahlen der 6.v.M. 2014 (nur Abrollvorgänge).

Anhand des in Unterabschnitt 5.1.3 beschriebenen Vorgehens wird berechnet, wie viele Luftfahrzeuge mit dem TaxiBot abgefertigt werden könnten, wenn die Kapazität der Abkoppelpositionen berücksichtigt wird. Für die Berechnung wird zunächst abgeschätzt, wie viel Platz die Abkoppelpositionen bieten. Tabelle 5.5 fasst die zur Verfügung stehenden räumlichen Kapazitäten zusammen¹⁷.

¹⁷ Für die Abschätzung des Platzbedarfs wurde eine maximale Gespannlänge von 80 m angenommen. Das längste Passagierflugzeug, eine B748, hat eine Länge von 76,3 m. Ein Wide-Body TaxiBot hat eine Länge von 13 m, verschwindet jedoch zum größten Teil unterhalb des Flugzeugrumpfes. Die Abkoppelposition N-North bietet ca. 285 m Platz, L-North 400 m.

Tabelle 5.5.: Räumliche Kapazität der Abkoppelpositionen.

| Abkoppelposition | Räumliche Kapazität |
|--------------------|--|
| N15 | 1 Flugzeug-TaxiBot-Gespann |
| N-North | 3 Flugzeug-TaxiBot-Gespanne hintereinander |
| L-North | 3 Flugzeug-TaxiBot-Gespanne hintereinander |
| Sierra Beam Yankee | 1 Flugzeug-TaxiBot-Gespann |

Zudem wurde von der Fraport AG eine Movement Table mit allen Flugbewegungen des Jahres 2014 bereitgestellt¹⁸ und nach Abbildung C.2 im Anhang C.7 aufbereitet. Der Anteil der damit berechneten Luftfahrzeuge ist ebenfalls in Abbildung 5.16 dargestellt. Werden die Triebwerke auf der Abkoppelposition gestartet, so könnte der TaxiBot realistischerweise nur noch für etwa 41 % der Abrollvorgänge verwendet werden. Wenn die Triebwerke beim DT gestartet werden, erhöht sich der Anteil leicht auf 44 %, da in diesem Fall die Abkoppelpositionen für einen kürzeren Zeitraum belegt sind.

5.4 Ergebnisse der Schallimmissionsberechnungen

Zur Gestaltung von Lärmkarten gibt es viele Gesetze, Richtlinien, Verordnungen und Standards. Auf Ebene der Europäischen Union stellt die Richtlinie 2002/49/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm [87] ein zentrales Dokument dar. In Deutschland dient die „Verordnung über die Lärmkartierung“ (34. Bundes-Immissionsschutzverordnung (BImSchV) [88]) zur Umsetzung der Richtlinie 2002/49/EG, enthält aber detailliertere Vorgaben für die grafischen Darstellung von Lärmkarten. In Anlehnung an die Vorgaben der 34. BImSchV [88] erfolgt die Ergebnisdarstellung in dieser Arbeit mittels Farbkarte und Isolinien des 24-Stunden-Beurteilungspegels der 6.v.M. 2014 (Isophone). Die gewählte Farbskala basiert auf einem von Weninger [89] erarbeiteten und anhand von Nutzerstudien untersuchten Farbschema. Das Farbschema wurde in der E DIN 45682 [90] aufgenommen, liegt jedoch zum jetzigen Zeitpunkt noch als Entwurfsfassung vor.

In einem ersten Schritt werden die Ergebnisse der verschiedenen Szenarien mittels Isophonen und farblicher Kennzeichnung der Pegelbereiche $\leq 45 \text{ dB(A)}$,

¹⁸ B. Schreiber, „Flugbewegungen 2014 Flughafen Frankfurt am Main“, Datenträger, Dezember 2016.

> 45 bis 50 dB(A), > 50 bis 55 dB(A), > 55 bis 60 dB(A), > 60 bis 65 dB(A), > 65 bis 70 dB(A), > 70 bis 75 dB(A) und > 75 dB(A) visualisiert. Für einen Vergleich der Szenarien dient der Flächeninhalt der einzelnen Pegelbereiche (Bereich zwischen zwei Isophonen) als Metrik. Beispielhaft werden im Folgenden die Berechnungsergebnisse für das Referenzszenario AETO (siehe Abbildung 5.17) sowie für das Szenario 1a (DT ohne Kapazitätsbetrachtung und Triebwerkstart auf der Abkoppelposition) (siehe Abbildung 5.18) grafisch dargestellt. Für das Szenario 1a wird der größte Unterschied zum AETO erwartet.

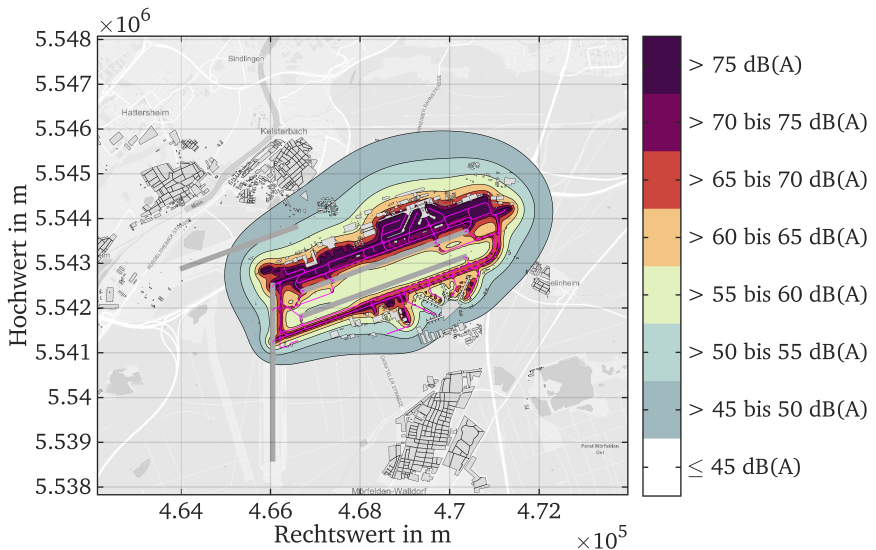


Abbildung 5.17.: 24-Stunden-Beurteilungspegel $L_{dn,Boden}$ für das Referenzszenario AETO. [Hintergrundkarte © Mapbox]

Ein Vergleich der beiden Abbildungen lässt erkennen, dass beim Szenario 1a eine Verlagerung der Schallimmissionen stattfindet. Beim AETO ist eine Wölbung der äußeren Isophone in nordöstliche Richtung erkennbar. Dies lässt sich dadurch erklären, dass die Triebwerke innerhalb der Positionsbereiche gestartet werden und der größte Teil sich im Terminalbereich 1 und 2 im Nordosten des Flughafens befindet. Diese Wölbung existiert im Szenario 1a nicht mehr. Es ist eine Verlagerung Richtung Westen und Südwesten zu beobachten. Zudem liegt ein etwas größerer Teil des Ortes Kelsterbach innerhalb des Pegelbereiches > 45 bis 50 dB(A). Darüber hinaus steigt der Schalldruckpegel auf dem Flughafengelände im Bereich der Abkoppelpositionen an. Auf den Abstellpositionen sowie auf den Rollwegen sinkt

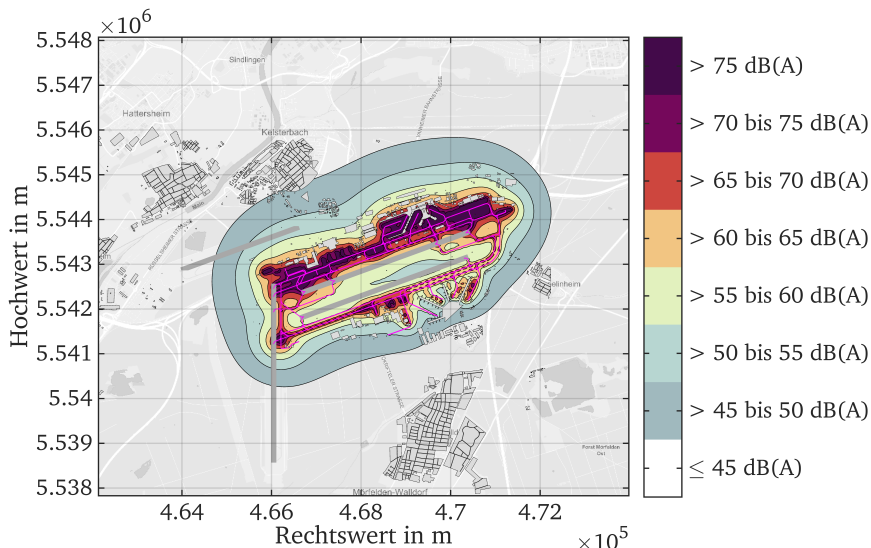


Abbildung 5.18.: 24-Stunden-Beurteilungspegel $L_{dn,Boden}$ für das Szenario 1a (DT ohne Kapazitätsbetrachtung und Triebwerkstart auf der Abkoppelposition). [Hintergrundkarte © Mapbox]

dagegen der Schalldruckpegel. Dieser Effekt ist auch bei den Szenarien 1b und 2b zu beobachten, wenn die Triebwerke schon während des operationellen Schleppens gestartet werden. Hierbei sind die Schalldruckpegel auf den Abkoppelpositionen jedoch geringer und dafür die Rollwegabschnitte vor den Abkoppelpositionen höher belastet. Eine Darstellung des Szenarios 1b sowie des Berechnungsergebnisses nach AzB [17] ist im Anhang C.8, Abbildung C.3 und Abbildung C.4, zu finden.

Die einzelnen Szenarien werden in Tabelle 5.6 miteinander verglichen. Hierfür wurden die Flächeninhalte der Pegelbereiche für das Referenzszenario AETO berechnet. Alle anderen Szenarien sowie der Vergleich mit der AzB [17] erfolgt als Ausdruck der prozentualen Änderung des Flächeninhalts. Es ist zu erkennen, dass die Flächeninhalte der nach AzB berechneten Pegelbereiche, insbesondere bei Berücksichtigung des Triebwerkstarts, um bis zu 58 % größer sind als beim Referenzszenario (Bereich > 45 bis 50 dB(A)). Die AzB ist daher in ihrer Auslegung eher konservativ und überschätzt die Werte. Der Vergleich mit den DT-Szenarien zeigt, dass die Flächeninhalte der äußeren Pegelbereiche tendenziell zunehmen und um bis zu 19,4 % (Szenario 1a) größer sind. Beim Triebwerkstart auf der Abkoppelposition (Szenario 1a und 2a) ist der Zuwachs größer als beim Starten der Triebwerke

Tabelle 5.6.: Vergleich der Szenarien anhand des Flächeninhalts der Pegelbereiche.

| Farbe | Pegelbereich in dB(A) | Flächeninhalt in km ² | Änderung des Flächeninhaltes in % | | | | | |
|-------|--------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|------------------------|---------------------------|-------|-------|-------|
| | | Referenzszenario | AzB ohne TW-Start | AzB mit TW-Start | Dispatch Towing Szenarien | | | |
| | | AETO | | | 1a | 1b | 2a | 2b |
| | > 45 bis 50 | 8,38 | +48,6 | +58,0 | +14,7 | +5,0 | +5,8 | +1,2 |
| | > 50 bis 55 | 4,73 | +26,6 | +35,1 | +19,4 | +11,1 | +14,8 | +9,7 |
| | > 55 bis 60 | 5,20 | +8,6 | +10,2 | -0,5 | -4,1 | -3,4 | -5,2 |
| | > 60 bis 65 | 3,35 | +5,7 | +11,8 | +2,6 | +1,8 | -0,1 | +0,5 |
| | > 65 bis 70 | 2,32 | +0,6 | +7,4 | -1,7 | -8,8 | -3,9 | -9,7 |
| | > 70 bis 75 | 1,64 | +0,5 | +1,8 | -10,9 | -3,2 | -10,3 | -2,6 |
| | > 75 | 1,88 | -13,4 | +1,9 | -19,2 | -14,9 | -24,9 | -18,7 |

während des DT (Szenario 1b und 2b). Wird die Kapazität der Abkoppelpositionen nicht betrachtet, so fällt der Zuwachs ebenfalls größer aus, als wenn die Kapazität der Abkoppelpositionen eine Limitierung der DT-Vorgänge bewirkt (Szenario 1a vs. 2a und Szenario 1b vs. 2b). Im Allgemeinen nehmen bei den DT-Szenarien die Flächeninhalte mit hohen Pegelbereichen im Vergleich zum Referenzszenario ab. Der Flächeninhalt des Pegelbereiches > 75 dB(A) beispielsweise, sinkt um 14,9 % (Szenario 1b) bis 24,9 % (Szenario 2a).

Sowohl die Lärmkarte des Szenarios 1a (vgl. Abbildung 5.18) als auch die Analyse der Flächeninhalte legt die Vermutung nahe, dass die Verlagerung des Triebwerkstarts zu den Startbahnen eine Auswirkung auf die Stadt Kelsterbach hat. Um die Unterschiede der einzelnen Szenarien besser herauszuarbeiten und die Auswirkungen auf Kelsterbach zu quantifizieren, werden Differenzplots erstellt. Abbildung 5.19 zeigt die zwischen Szenario 1a und dem Referenzszenario gebildete Differenz der Schallimmissionspegel. Auf dem Flughafengelände ist im Bereich der Abstellpositionen und Rollwege eine Abnahme des Schalldruckpegels erkennbar. Die Pegel werden hier um bis zu 7,6 dB(A) reduziert. Eine deutliche Zunahme der Schalldruckpegel ist hingegen auf den Abkoppelpositionen erkennbar. Hier steigt der Schalldruckpegel um bis zu 30,8 dB(A) im Vergleich zum Referenzszenario. Der westliche Teil Kelsterbachs würde im Falle des Szenarios 1a eine Zunahme der

Schalldruckpegel um 1 bis 3 dB(A) erfahren. Die Änderung im östlichen Teil liegt hingegen im Bereich von -1 bis +1 dB(A). Auch für die Stadt Mörfelden-Walldorf lässt sich eine Zunahme der Schallimmissionen erwarten. Das Berechnungsraster ist hier jedoch begrenzt, sodass keine eindeutige Aussage getroffen werden kann.

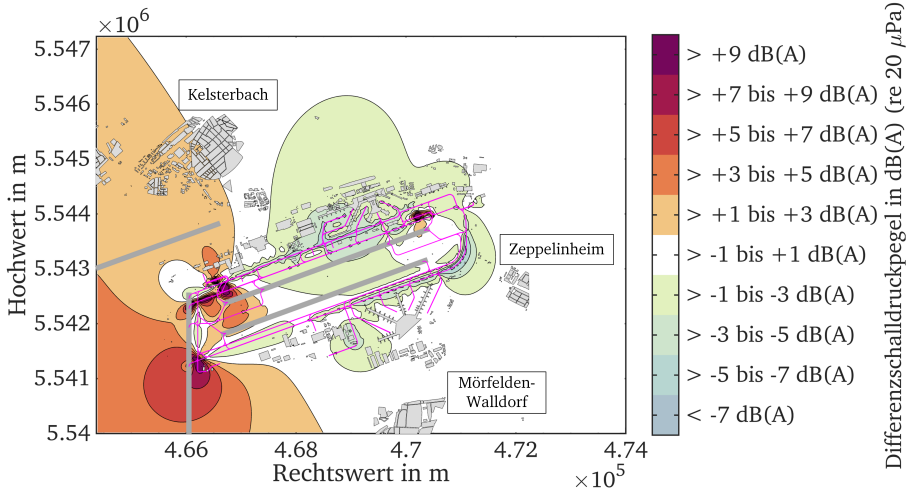


Abbildung 5.19.: Differenz zwischen Szenario 1a und Referenzszenario (DT, ohne Kapazitätsbetrachtung, Triebwerkstart auf Abkoppelposition minus AETO).

Die Differenz zwischen Szenario 1b und dem Referenzszenario ist in Abbildung 5.20 zu sehen. Durch das Starten der Triebwerke während des operationellen Schleppens fällt die Zunahme des Schalldruckpegels auf den Abkoppelpositionen geringer aus. Dies hat auch Auswirkungen auf Kelsterbach. Nur noch der äußere westliche Teil der Stadt erfährt eine Schallpegelzunahme zwischen 1 und 3 dB(A).

Um die Auswirkungen auf Kelsterbach genauer quantifizieren zu können, wird ein rechteckiges Gebiet um die Stadt gelegt (siehe Anhang C.8, Abbildung C.5). Die darin enthaltenen Schallimmissionspegel der Rasterpunkte werden aufsummiert und durch die Anzahl der Rasterpunkte in dem Gebiet dividiert. Auf diese Weise wird die durchschnittliche Pegeländerung für die Stadt Kelsterbach berechnet und die Ergebnisse in einer Matrix für alle möglichen Szenariokombinationen dargestellt (siehe Tabelle 5.7). Im Vergleich zum AETO wird beim Szenario 1a eine durchschnittliche Pegeländerung um +1,29 dB(A) erreicht, beim Szenario 1b sind es +0,66 dB(A). Wird die Kapazität der Abkoppelpositionen berücksichtigt, so fällt der Pegelanstieg geringer aus, da weniger Luftfahrzeuge mit dem TaxiBot ab-

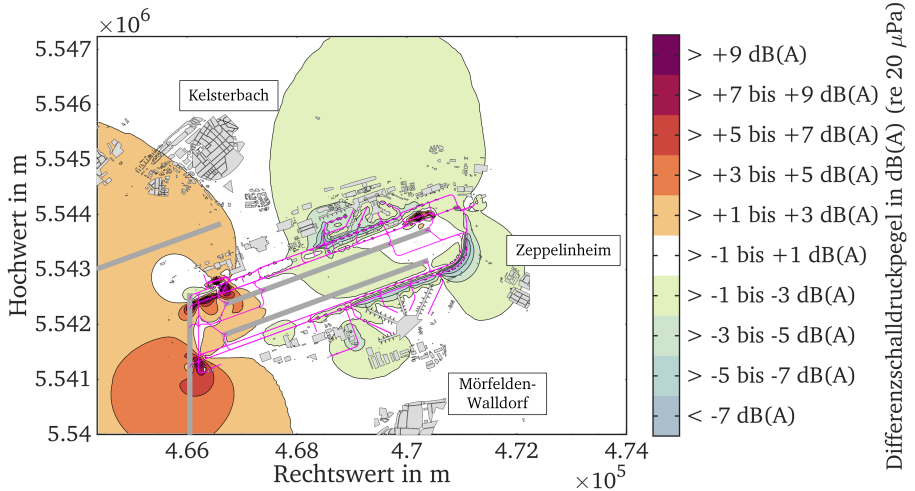


Abbildung 5.20.: Differenz zwischen Szenario 1b und Referenzszenario (DT, ohne Kapazitätsbetrachtung, Triebwerkstart beim DT minus AETO).

gefertigt werden können. Es ist jedoch auch zu erkennen, dass die Berechnungen gemäß AzB [17] im Vergleich zum Referenzszenario +2,41 dB(A) (ohne Triebwerkstart) bzw. +2,90 dB(A) (mit Triebwerkstart) im Bereich Kelsterbach ausmachen und damit eher konservative Berechnungen darstellen.

Tabelle 5.7.: Durchschnittliche Änderung des Schallimmissionspegels für die Stadt Kelsterbach in dB(A). Für die Berechnung werden der Pegel des Szenarios aus Spalte 1 vom Pegeln des Szenarios in Zeile 1 der Ergebnismatrix subtrahiert.

| Szenario | Referenz | Dispatch Towing Szenarien | | | | | |
|-------------------|----------|---------------------------|------------------|-------|-------|-------|-------|
| | AETO | AzB ohne TW-Start | AzB mit TW-Start | 1a | 1b | 2a | 2b |
| AETO | – | +2,41 | +2,90 | +1,29 | +0,66 | +0,30 | +0,08 |
| AzB ohne TW-Start | | – | +0,49 | –1,13 | –1,76 | –2,11 | –2,34 |
| AzB mit TW-Start | | | – | –1,61 | –2,24 | –2,60 | –2,82 |
| 1a | | | | – | –0,63 | –0,99 | –1,21 |
| 1b | | | | | – | –0,36 | –0,58 |
| 2a | | | | | | – | –0,22 |
| 2b | | | | | | | – |

5.5 Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse

Der Begriff Validierung wird nach VDI 3633 [78] als „Überprüfung der hinreichenden Übereinstimmung von Modell und System“ definiert, „die sicherstellen soll, dass das Modell das Verhalten des realen Systems im Hinblick auf die Untersuchungsziele genau genug und fehlerfrei widerspiegelt“. Im Rahmen dieser Arbeit ist eine vollständige Validierung der Berechnungsergebnisse jedoch nicht möglich. Das Modell und die damit erzielten Ergebnisse bilden lediglich einen Ausschnitt der Realität ab: Es wird nur der Immissionsschalldruckpegel berechnet, der durch Rollverkehr, Triebwerkstarts und APU-Einsätze verursacht wird. In Wirklichkeit setzen sich Immissionen aber immer aus verschiedenen Schallquellen zusammen, die vom Mikrofon erfasst und oft nicht separiert werden können. Zudem werden die Messergebnisse durch Witterungsbedingungen beeinflusst. Am ehesten kann eine Validierung mithilfe von überwachten Messungen erfolgen, bei denen Störpegel manuell gekennzeichnet werden können. Dies ist jedoch eine sehr aufwendige und im Kontext dieser Arbeit nicht realisierbare Möglichkeit. Zudem ist das Be-

rechnungsergebnis ein Beurteilungspegel, der die 6 v. M. eines Jahres einbezieht. Dies müsste ebenfalls von den Messungen abgebildet werden. Aus diesen Gründen beschränkt sich die Kontrolle der Ergebnisse auf eine reine Plausibilitätsprüfung. Darunter wird nach Rabe et al. [77] die Überprüfung der Angemessenheit des Ergebnisses für die Anwendung sowie die Schlüssigkeit der Ergebnisse verstanden.

Für die Prüfung der Plausibilität werden die Berechnungsergebnisse mit den Messergebnissen zweier von der Fraport AG installierter Messstationen verglichen. Zudem wurden eigene Messungen vorgenommen, die jedoch nur über einen sehr kurzen Zeitraum stattfanden und somit nur zur Einordnung dienen. Abbildung 5.21 zeigt die Positionen der Fraport-Messstationen Kelsterbach 08 und Zeppelinheim 03 sowie die eigene Messstation, die sich unweit der Station Kelsterbach 08 befindet.

Den Vergleich der A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegel zeigt Abbildung 5.22. In der Darstellung wird zwischen Tag (6 Uhr bis 22 Uhr) und Nacht (22 Uhr bis 6 Uhr) unterschieden, da die Pegel in dieser Form erfasst wurden und in einem Bericht der Fraport AG an die Fluglärmkommission [91] vorliegen. Es sei darauf hingewiesen, dass die in dem Bericht veröffentlichten Pegel für die 6 v. M. des Jahres 2017 gelten. Die berechneten Werte beziehen sich jedoch auf das Jahr 2014. Die Anzahl der Flugbewegungen der beiden Jahre ist jedoch vergleichbar. Im Jahr 2017 waren es lediglich 6.000 Flugbewegungen und damit 1,4 % mehr als im Jahr 2014. Die eigenen Messungen fanden am 08.03.2018 von 10:09 Uhr bis 11:09 Uhr (Tag) und am 19.04.2018 von 04:47 Uhr bis 05:47 Uhr (Nacht) statt. Der Vergleich zeigt, dass die berechneten Schalldruckpegel sowohl am Tag als auch in der Nacht und an beiden Immissionsorten unterhalb der gemessenen Werte liegen. Da die berechneten Immissionspegel nur einen Teil der in Realität beitragenden Geräusche beinhalten, sind niedrigere Werte plausibel. Für die Messstation Kelsterbach 08 liegen die Pegeldifferenzen zwischen berechneten und gemessenen Werten bei $\Delta L_{p,A,eq,Tag} = 6 \text{ dB(A)}$ und $\Delta L_{p,A,eq,Nacht} = 4,6 \text{ dB(A)}$. Die Werte der eigenen Messungen liegen nochmals über denen der Messstation Kelsterbach 08, sind jedoch jeweils nur für eine Stunde aufgezeichnet worden. Für die Messstation Zeppelinheim 03 ergibt sich eine etwas größere Differenz zu den berechneten Werten ($\Delta L_{p,A,eq,Tag} = 7 \text{ dB(A)}$ und $\Delta L_{p,A,eq,Nacht} = 9,9 \text{ dB(A)}$). Dies könnte dadurch begründet sein, dass die Messstation aufgrund der Lage direkter von An- und Abflügen betroffen ist.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die berechneten Werte insgesamt plausibel sind. Da die Messstationen jedoch einen Mix aus Schallquellen erfassen (z. B. An- und Abflüge, Überflüge, Taxi-ins, Verkehrs- und Freizeitlärm) ist ein Vergleich schwierig. Die Berechnungen wurden für einen Spezialfall angestellt und sind in Form des absoluten Pegels wenig aussagekräftig.

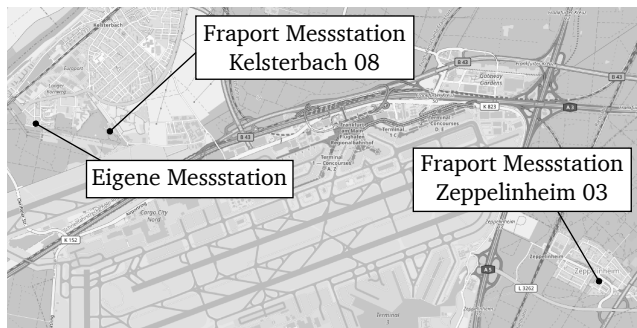


Abbildung 5.21.: Übersicht der Messstationen für die Plausibilitätsprüfung der Berechnungsergebnisse. [Eigene Darstellung, Hintergrundkarte aus Openstreetmap, Lizenz CC-BY-SA 2.0.]

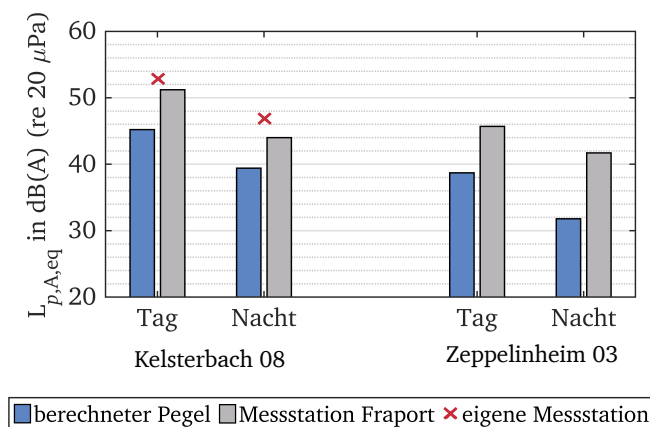


Abbildung 5.22.: Vergleich berechneter und gemessener Schallimmissionspegel.

5.6 Diskussion der Berechnungsergebnisse

Nachdem die Ergebnisse der Schallimmissionsberechnung vorgestellt wurden, werden in diesem Abschnitt die Ergebnisse diskutiert.

5.6.1 Interpretation

Die berechneten Schallimmissionspegel für die Stadt Kelsterbach liegen in den meisten Szenarien unter 45 dB(A). Lediglich für das Szenario 1a schneidet die 45 dB(A)-Isophone den südlichen Teil der Stadt (vgl. Abbildung 5.18). Obwohl die Schalldruckpegel nach der Berechnungsvorschrift AzB [17] ermittelt wurden, ist es an dieser Stelle nicht sinnvoll, die Ergebnisse mit den im Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm (FluLärmG [92]) festgesetzten Tag- und Nacht-Schutzzonen zu vergleichen¹⁹. Das liegt daran, dass die Berechnung dieser Zonen alle Flugbewegungen eines Flughafens einschließt. Zusätzlich zu den Taxi-out Vorgängen sind Taxi-ins, An- und Abflüge sowie Starts und Landungen enthalten. Die berechneten Pegel lassen sich jedoch beispielsweise mit den in der 16. BImSchV [93] definierten Grenzwerte für Wohngebiete vergleichen. Hier sind 59 dB(A) für den Tag und 49 dB(A) für die Nacht vorgegeben. Die berechneten Pegel in Kelsterbach liegen somit darunter. Auch Studien belegen, dass eine derart niedrige Belastung zu keiner signifikanten Belästigungsreaktion führt. So stellt z. B. Schulz [94] fest, dass Pegel, die während des Tages unter 50 dB liegen, wenig oder keine schwerwiegende Belästigung darstellen. Eine absolute Aussage lässt sich hier jedoch schwer machen. Umgebungslärm setzt sich immer aus unterschiedlichen Schallquellen zusammen. Auch der Straßen- und Schienenverkehr tragen u. a. zum Gesamtschalldruckpegel bei und der durch Abrollvorgänge verursachte Lärm kann nicht isoliert betrachtet werden. Außerdem wurden bei den Berechnungen Abschirmungen durch Hindernisse nicht modelliert. Damit sind die Absolutwerte als noch niedriger einzuschätzen.

Aufgrund der erschwerten Aussage anhand des Absolutpegels liegt der Schwerpunkt der Arbeit auf der Bewertung des Differenzpegels zweier Vergleichsszenarien. Bei der Betrachtung von Differenzen entfallen nämlich Einflüsse, wie Abschirmungen, Reflexionen oder Dämpfung des Schalls durch Bodenbewuchs. Das Ergebnis des Vergleichs der Szenarien AETO und 1a zeigt eine Zunahme des Schalldruckpegels in der Stadt Kelsterbach um bis zu 2,56 dB(A). Im Durchschnitt beträgt die Pegelzunahme 1,29 dB(A). Grund hierfür ist die Verlagerung des Triebwerkstarts beim operationellen Schleppen auf die Abkoppelpositionen. Insbesondere die Schallemissionen auf den Abkoppelpositionen N-North und N15 im Nordwesten des Flughafens wirken sich auf Kelsterbach aus. Im Szenario 1a, bei dem die Kapa-

¹⁹ Das FluLärmG [92] setzt in §4 Abs. 2 Lärmschutzbereiche fest. Diese bestehen aus der Tag-Schutzzone 1 ($L_{p,A,eq,Tag} = 60 \text{ dB(A)}$), der Tag-Schutzzone 2 ($L_{p,A,eq,Tag} = 55 \text{ dB(A)}$) sowie der Nacht-Schutzzone ($L_{p,A,eq,Tag} = 50 \text{ dB(A)}$ und $L_{A,max} = 6 \text{ mal } 53 \text{ dB(A)}$). Befindet sich ein Grundstück in einem solchen Lärmschutzbereich, so sind sowohl für die Errichtung baulicher Anlagen als auch für bestehende bauliche Anlagen bestimmte Schallschutzanforderungen einzuhalten.

zität der Abkoppelpositionen keine Rolle spielt, sind es ca. 38 % aller Taxi-outs, bei denen auf diesen beiden Positionen die Triebwerke gestartet werden.

Zur Einordnung der berechneten Schallpegeländerung wird zunächst die 16. BImSchV [93] herangezogen. Hier wird eine Änderung des Schallpegels als *wesentlich* bezeichnet, wenn der Pegel mindestens um 3 dB(A) erhöht wird. Nach wissenschaftlichen Erkenntnissen kann das menschliche Ohr jedoch weitaus geringere Pegelunterschiede wahrnehmen. So untersuchten beispielsweise die japanischen Wissenschaftler Namba und Kuwano [95] die Lautstärkewahrnehmung von Überflügen. Es zeigte sich, dass ein Anstieg des Überflugpegels um 1 dB erkannt wurde und zu einer signifikant höheren Lautstärkeeinschätzung führte. Des Weiteren untersuchten Schilpköter und Kastka [96] in einer Studie die Wirksamkeit von verkehrsberuhigenden Maßnahmen. Das Ergebnis zeigte, dass sich trotz geringer Pegelsenkungen von durchschnittlich 1 dB(A) bis 2 dB(A) eine erhebliche Abnahme der Belästigung, die einer Schallpegelreduzierung von 6 dB(A) bis 14 dB(A) entsprach, eingestellt hat. Dies lässt sich hier auch auf den umgekehrten Fall überführen: bei einer Pegelzunahme von bis zu 2,56 dB(A) wird sich voraussichtlich der Anteil der belästigten Anwohner erhöhen. Dies gilt vor dem Hintergrund, dass sich Kelsterbach nicht im überflogenen An- und Abflugbereich befindet und somit der Einfluss von Fluglärm minimiert ist (vgl. Unterabschnitt 3.2.3). Je nach Ausprägung des Verkehrslärms ist Bodenschall hier eine der bedeutendsten Schallquellen.

Die Szenarien 1b, 2a und 2b zeigen im Vergleich zum AETO einen deutlich geringeren Pegelzuwachs. Bleibt die Kapazität der Abkoppelpositionen nach heutigen Stand erhalten, so liegt die Zunahme des Schalldrucks in einem kaum wahrnehmbaren Bereich. Werden die Triebwerke schon während des Schleppvorgangs gestartet, so wirkt sich dies ebenfalls positiv auf die Schallabstrahlung Richtung Kelsterbach aus.

Allgemein und vom Flughafen Frankfurt losgelöst, lässt sich festhalten, dass es wichtig ist, die individuellen Verhältnisse eines Flughafens zu untersuchen. Die Lage der Abkoppelpositionen sollte sich idealerweise nicht in der Nähe der von Bodenschall betroffenen Ortschaften befinden. Ist dies aufgrund der Positionierung der Startbahnen unvermeidbar, so sind ggf. besondere Schallschutzmaßnahmen auf den Abkoppelpositionen zu treffen. Denkbar ist beispielsweise eine Abschirmung, wie sie bei Probeläufen von Triebwerken verwendet wird. Aus lärmtechnischer Sicht ist die Verwendung des TaxiBots für lang andauernde Taxi-in Vorgänge am erfolgversprechendsten. Dabei entfällt der Triebwerkstart und die Triebwerke können nach dem Abkühlen für den Rest der Strecke abgeschaltet werden.

5.6.2 Methodische Bewertung

Zusammengefasst ist die Berechnungsmethode gut geeignet, um einen akustischen Vergleich verschiedener operationeller Verfahren für Flugzeugbewegungen am Boden anzustellen. Hier liegt auch der Fokus, da die Berechnung gemäß Vorgaben der AzB [17] z. B. Dämpfung durch Bewuchs, Abschirmung, Beugung oder Reflexionen durch Hindernisse oder den Wettereinfluss vernachlässigt. Damit und durch den Verzicht der Modellierung von zu Fluglärm beitragenden Vorgängen, sind die absoluten Schallimmissionspegel wenig aussagekräftig. Um die berechneten Abso- lutpegel näher an die Realität heranzubringen, sind neben einer Berücksichtigung der zuvor genannten Aspekte folgende Maßnahmen denkbar:

- Verwendung von Oktavschalldruckpegeln, die die Triebwerke im Idle-Zustand repräsentieren, anstatt die Anflugdatensätze mit einem pauschalen Zusatzpegel zu versehen
- Verwendung von Oktavschalldruckpegeln, die nicht in Luftfahrzeugklassen gruppiert sind, sondern jeden einzelnen Luftfahrzeugtyp charakterisieren
- Modellierung von Beschleunigungen und Verzögerungen auf den Rollwegen
- Einführung einer Wartegeschwindigkeit vor dem Startbahnkopf

Die vorangegangenen Vorschläge bedürfen jedoch einer weitaus detaillierteren Datenbasis, die es bislang nicht gibt.

Der Vergleich des Referenzszenarios AETO mit der Berechnung nach AzB zeigt, dass die Flächeninhalte der einzelnen Pegelbereiche beim Referenzszenario niedriger ausfallen (vgl. Tabelle 5.6). Begründung hierfür ist die vorgenommene Anpassung der Rollgeschwindigkeiten, die Berücksichtigung des Triebwerkstarts sowie die Verwendung von Luftfahrzeugklassen-spezifischen APU-Oktavschalldruckpegeln. Damit überschätzt die AzB die immittierten Pegel eher etwas.

Bei der Modellierung des operationellen Schleppens wurde die Hin- und Rückfahrt des TaxiBots vernachlässigt. Dies beruht auf den Erkenntnissen aus den Schalldruckpegelmessungen (vgl. Unterabschnitt 4.3.2). Daraus geht hervor, dass der äquivalente Dauerschallpegel des TaxiBots etwa 14 dB(A) unter dem beim operationellen Schleppen gemessenen Dauerschallpegel liegt. Der damit gemachte Fehler liegt bei maximal 0,2 dB(A).

5.6.3 Zusammenfassung und Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde eine Berechnungsmethode vorgestellt, die es ermöglicht, das operationelle Schleppen mit konventionellem Rollen zu vergleichen. Dazu wurden Taxi-out Vorgänge der 6 v. M. des Jahres 2014 untersucht und Schallimmissionspegel gemäß der Berechnungsvorschrift AzB ermittelt.

Neben dem prinzipiellen Aufbau des Berechnungsprogramms wurde die Modellbildung und Berechnungsmethode vorgestellt, die die einzelnen Emittenten während des Rollvorgangs einbezieht. Die exemplarische Untersuchung erfolgte für den Flughafen Frankfurt am Main, der mit seinen Eigenheiten (z. B. bzgl. der Rollweganordnung oder der Abkoppelpositionen) im Berechnungsprogramm abgebildet wurde.

Die Beurteilung der operationellen Schleppverfahren erfolgte anhand eines Szenariovergleichs. Die Ergebnisse lassen im Fall Frankfurt eher auf eine nachteilige akustische Wirkung des TaxiBot-Einsatzes für die Stadt Kelsterbach schließen. Dies ist durch die Lage der Abkoppelpositionen begründet, auf die der Triebwerkstart verlagert wird.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Dieses Kapitel fasst die Untersuchungsergebnisse der vorliegenden Arbeit zusammen. Im Anschluss folgt ein Ausblick mit Empfehlungen für weiterführende Untersuchungen.

6.1 Zusammenfassung

Im Kontext dieser Arbeit wurden neuartige operationelle Schleppverfahren akustisch untersucht und mit dem konventionellen, triebwerksangetriebenen Rollverfahren verglichen. Die Untersuchung und Bewertung der neuen Verfahren erfolgte im Wesentlichen in zwei Schritten. Im ersten Schritt wurden akustische Messungen durchgeführt. Anschließend wurden Schallimmissionspegel berechnet und eine Szenarioanalyse vorgenommen.

Im ersten Kapitel wurde die Motivation der Arbeit dargelegt. Vor dem Hintergrund immer weiter zunehmender Flugbewegungen steigt auch die durch den Luftverkehr verursachte ökologische Belastung der Anwohner von Flughäfen. Eine neue Flugzeugschlepper-Technologie (TaxiBot) verspricht für Entlastung durch eine Reduzierung des am Boden erzeugten Lärms zu sorgen. Der TaxiBot bewirkt jedoch, dass sich das heutige Rollverfahren grundlegend ändert. Die akustischen Auswirkungen hierdurch sind bisher unerforscht und wurden in dieser Arbeit beleuchtet.

Die Grundlagen der Arbeit wurden in Kapitel 2 erläutert. Neben einer Vorstellung der TaxiBot-Technologie wurden die Besonderheiten des operationellen Schleppens aufgezeigt und die Unterschiede zum konventionellen Rollen hervorgehoben. Darüber hinaus wurde der Begriff Bodenlärm von Fluglärm abgegrenzt und die akustischen Grundlagen beschrieben.

Da Bodenlärm im Vergleich zu Fluglärm augenscheinlich eine eher untergeordnete Schallquelle darstellt und auch in der Literatur nur in wenigen Studien auftaucht, wurde vorab eine Anwohnerbefragung im Umfeld des Flughafens Frankfurt durchgeführt (vgl. Kapitel 3). Mithilfe einer schriftlichen Befragung in den Gebieten Kelsterbach und Mörfelden-Walldorf wurde untersucht, ob Anwohner des Flughafens Frankfurt Bodenlärm wahrnehmen können und sich dadurch belästigt fühlen. Obwohl in den Hauptuntersuchungsgebieten (Kelsterbach) die in der Literatur beschriebene Dosis-Wirkungs-Beziehung nicht repliziert werden konnte, ergaben

sich signifikante Unterschiede in der Lärmbelästigung zwischen den Hauptuntersuchungsgebieten und der Kontrollgruppe (Mörfelden-Walldorf). Mehr als 36 % der Befragten in Kelsterbach fühlten sich sogar „stark“ durch Bodenlärm belästigt. Die Befragungsergebnisse lassen Rückschlüsse auf die Relevanz des Themas zu. Daraus kann ein Handlungsbedarf abgeleitet werden.

Mit der damit geschaffenen Grundlage für diese Arbeit wurden am Flughafen Frankfurt akustische Messungen durchgeführt. Die hierfür weiterentwickelten Messmethoden und Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Kapitel 4 dargestellt. Anhand der Messungen konnte ein direkter Vergleich zwischen Schlepp- und Rollverfahren vorgenommen werden. Bei der Vorbeifahrt eines Flugzeug-TaxiBot-Gespans konnte eine Reduzierung des A-bewerteten äquivalenten Dauerschallpegels um 13,2 dB(A) festgestellt werden und das, obwohl beim operationellen Schleppen die APU in Betrieb ist. Im direkten Vergleich konnte somit eine deutliche Reduzierung des gemessenen Schalldruckpegels nachgewiesen werden. Da die Ergebnisse jedoch nur für Einzelbewegungen und lokal gelten, wurden zusätzlich Schallausbreitungsberechnungen durchgeführt (vgl. Kapitel 5).

Anhand der Berechnungen wurden die Schallimmissionen ebenfalls für das Beispiel Frankfurt auf dem Flughafengelände sowie im Nahbereich des Flughafens berechnet. Dazu wurden alle Taxi-out Vorgänge der 6 v. M. des Jahres 2014 abgebildet. Zur Beurteilung des neuen Schleppverfahrens wurde ein Szenariovergleich durchgeführt. Die Berechnung eines Differenzpegels für die Stadt Kelsterbach zeigte eine durchschnittliche Zunahme des Pegels um ca. 1,3 dB(A), wenn der TaxiBot alle technisch möglichen Flugzeugtypen abfertigt. Grund für das Ergebnis ist die Lage der Startbahnen und der sich in der Nähe befindenden Abkoppelpositionen. Da sich gleich zwei Abkoppelpositionen unweit der Stadt Kelsterbach befinden und der Triebwerkstart beim operationellen Schleppen hierhin verlagert wird, ist die Stadt dadurch besonders betroffen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass jeder Flughafen in Verbindung mit der Lage der Abkoppelpositionen und Städte im Nahbereich des Flughafens separat untersucht werden müsste. So kann sich beispielsweise auch ein positiver Effekt des operationellen Schleppens einstellen, wenn die Abkoppelpositionen weit vom Stadtgebiet entfernt sind. Zudem ist auch der Einsatz von Schallschutzmaßnahmen denkbar, wenn eine Verlagerung der Abkoppelpositionen nicht möglich ist. Abgesehen vom akustischen Effekt des operationellen Schleppens liegt die Hauptstärke der Verwendung des TaxiBots in der Treibstoff- und Schadstoffemissionseinsparung. Hierfür wird jedoch auf die Abschlussberichte des Projekts Airport eMove verwiesen (vgl. [6, 7]).


6.2 Ausblick

Zu jeder der drei Hauptthematiken dieser Arbeit (Befragung, Messung, Berechnung) ergibt sich weiterer Forschungsbedarf.

Im Hinblick auf die Befragung könnte das Dosis-Wirkungs-Modell in folgenden Arbeiten weiter verfeinert werden. Die Einstellung gegenüber der Lärmquelle und die Lärmempfindlichkeit zeigen, dass eine Belästigung nicht ausschließlich auf die Belastung zurückzuführen ist. Es könnten noch weitere Variablen berücksichtigt werden, die einen Einfluss auf die Belästigung haben. In dieser Arbeit zeigte z. B. die Wohndauer einen Zusammenhang mit der Belästigung. Es wurde die Vermutung aufgestellt, dass damit auch die Erwartung an das Wohnumfeld zusammenhängen könnte. Weiterhin könnte die Entwicklung eines Belästigungsfragebogens für Bodenlärm vorangetrieben werden. Aktuell gibt es nur ein standardisiertes Item, das Lärmbelästigung erfasst. Da Lärmbelästigung ein Konstrukt mit vielen Einflussfaktoren darstellt, ist die Weiterentwicklung des vorliegenden Konstrukts sinnvoll. Hierzu wurde in dieser Arbeit ein erster Ansatz vorgestellt. Darüber hinaus wäre die Untersuchung von Bodenlärm und dessen Auswirkungen mit weiteren Stakeholdern denkbar. Vorrangig kann hier das Bodenpersonal am Flughafen Frankfurt genannt werden, das den Quellen von Bodenlärm am nächsten ist. Durch die hohen Expositionswerte an diesem Lärmarbeitsplatz können sich bei den Mitarbeitern ganz andere Auswirkungen ergeben als bei den Anwohnern im Flughafennahbereich.

Die akustischen Messwerte wurden als Vorbeifahrtpegel bzw. Pegel des Standgeräusches aufgenommen. Zukünftige Forschungsarbeit könnte jedoch Messverfahren anwenden, bei denen eine dreidimensionale Hüllfläche um die Schallquelle aufgespannt und vermessen wird. Auf diese Weise kann die Schallleistung als ortsunabhängige Größe ermittelt werden. Diese enthält keine äußeren Einflüsse, wie z. B. Beiträge anderer Quellen oder des umgebenden Raumes. Die so ermittelten Schallleistungspegel können dann als akustische Basis Eingang in Schallimmissionsberechnungen finden. Dies wurde in dieser Arbeit aufgrund der Dimensionen eines Flugzeugs bzw. Schleppers nicht vorgenommen. Eine zusätzliche Möglichkeit, die Messmethode für Vorbeifahrten zu erweitern, ist die Vermessung von beschleunigten oder verzögerten Fahrten.

Das Programm zur Schallimmissionsberechnung könnte insbesondere durch die Implementierung von Abschirmungen und Reflexionen durch Hindernisse realitätsnäher gemacht werden. So könnten beispielsweise bereits vorhandene Schallschutzmauern oder Flughafengebäude in ihrer Wirkung berücksichtigt werden. Zudem könnte eine weitere Bewertungsmetrik untersucht werden. In der vorliegenden Arbeit werden alle Immissionspunkte innerhalb der Stadt Kelsterbach unge-



wichtet miteinander verrechnet. Es könnte jedoch jeder Immissionspunkt mit einer Anwohnerzahl hinterlegt werden und somit gewichtet in die Berechnung der Bewertungsmetrik eingehen. Dies würde eine genauere Beurteilung der Schallpegeländerung zulassen. Eine wichtige Erweiterung des Berechnungsprogramms besteht in der Berücksichtigung von Taxi-in Vorgängen sowie An- und Abflügen. Dadurch wird eine Quantifizierung des Bodenlärmanteils am Gesamtlärm eines Flughafens möglich.

Literaturverzeichnis

- [1] DFS Deutsche Flugsicherung GmbH. (2019) *Pressemitteilung*. [Online]. Verfügbar: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Presse/Pressemitteilungen/2019/28.01.2019.-%20Wachstum%20des%20Luftverkehrs%20beschleunigt%20sich/ [Zugriff am: 04.01.2020]
- [2] DFS Situation and Information Centre (LIZ), „LIZ Annual Summary 2018,“ 2019. [Online]. Verfügbar: https://www.dfs.de/dfs_homepage/de/Unternehmen/Zahlen%20und%20Daten/Statistiken/Annual_Summary_2018.pdf [Zugriff am: 06.04.2019]
- [3] Fraport AG. (2019) *Frankfurt Airport - Daten und Fakten zum Flughafen Frankfurt*. [Online]. Verfügbar: <https://www.frankfurt-airport.com/de/reisen/am-flughafen.detail.suffix.html/article/b2b/airlines---touristik/airlines/daten-und-fakten/daten-und-fakten.html> [Zugriff am: 06.04.2019]
- [4] Fraport AG, „Detaillierte flugbetriebliche Analyse zur Nutzung von TaxiBot in Bezug auf die operativen Auswirkungen auf den Rollverkehr am Flughafen Frankfurt Main: Untersuchung für Lufthansa Engineering and Operational Services GmbH, Frankfurt am Main,“ Ergebnisbericht, 2013.
- [5] A. Schlegel, *Bodenabfertigungsprozesse im Luftverkehr: Eine statistische Analyse am Beispiel der Deutschen Lufthansa AG am Flughafen Frankfurt/Main*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2010.
- [6] K. Hein, „Airport eMove - Elektromobile Rollen und Schleppen zur Verringerung von Bodenlärm und Kerosin-Verbrauch: Schlussbericht der TU Darmstadt,“ Darmstadt, 2018.
- [7] Lufthansa Engineering and Operational Services GmbH (Lufthansa LEOS), „Airport eMove FKZ 03EM0510C - eSchlepper & TaxiBot: Abschlussbericht,“ Frankfurt, 2018.
- [8] Europäische Kommission, „Flightpath 2050: Europe's vision for aviation: maintaining global leadership and serving society's needs,“ Report of the High Level Group on Aviation Research, Luxemburg, 2011.
- [9] Möhler + Partner Ingenieure AG, SoundPLAN GmbH und Avia Consult, „NORAH. Verkehrslärmwirkungen im Flughafenumfeld: Erfassung der Verkehrsgerauschemposition,“ Endbericht, Band 2: Dokumentation zur Berechnung der akustischen Daten in NORAH, 2015.
- [10] OBERMEYER PLANEN + BERATEN GmbH, „Planfeststellungsverfahren 3. Start- und Landebahn: Schalltechnische Untersuchung, Teil B Bodenlärm,“ München, 2010.
- [11] „Erste Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen vom 27. Dezember 2008 (BGBl. I S. 2980): 1. Flug-LSV,“ 2008.
- [12] H. Boden, J. Aslan und M. Yousif, „A study of annoyance caused by ground based activities at bromma airport,“ in *ICSV: 17th International Congress on Sound and Vibration*, Vol. 4, 2010, S. 3038–3045.

-
- [13] Bickerdike Allen Partners, „GB Belfast City Airport Modification of Planning Agreement: Noise Report,” 2013.
- [14] Lufthansa Engineering and Operational Services GmbH (Lufthansa LEOS), „TaxiBot: Technical Data Specification,” 2012.
- [15] M. Stappen und J. Krönert, „Conceptual Design of an Operations Manual for the Beta Test of the TaxiBot System at Frankfurt Airport in 2013,” Hochschule Bremen, Bremen, 2012.
- [16] W. J. Bräunling, *Flugzeugtriebwerke: Grundlagen, Aero-Thermodynamik, ideale und reale Kreisprozesse, Thermische Turbomaschinen, Komponenten, Emissionen und Systeme*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [17] „Erste Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen vom 27. Dezember 2008. Anlage 2: Anleitung zur Berechnung von Lärmschutzbereichen (AzB): 1. FlugLSV,” in *Bundesanzeiger 195a*, 2.
- [18] Gesellschaft für Luftverkehrsforschung (GfL), „Bericht zum Externen Risiko für den Ausbau des Flughafen Frankfurt Main: Gutachten G 13,” 2001.
- [19] D. Maute, *Technische Akustik und Lärmschutz*. München, Wien: Carl Hanser Verlag, 2006.
- [20] H. Hoffmann, A. von Lüpke und J. H. Maue, *0 Dezibel + 0 Dezibel = 3 Dezibel: Einführung in die Grundbegriffe und die quantitative Erfassung des Lärms*, 7. Aufl. Berlin: Erich Schmidt Verlag, 1999.
- [21] R. Storm, „Kompendium Maschinenakustik, Band 1: Einführung in die technische Akustik,” Studienskript, Institut für Systemzuverlässigkeit und Maschinenakustik, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [22] *Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen (IEC 61672-1:2002)*, DIN EN 61672-1:2003-10, 2003.
- [23] P. Zeller, *Handbuch Fahrzeugakustik: Grundlagen, Auslegung, Berechnung, Versuch*, 2. Aufl. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012.
- [24] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, „Umweltbewusstsein in Deutschland 2016: Ergebnisse einer repräsentativen Bevölkerungsumfrage,” 2017. [Online]. Verfügbar: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/umweltbewusstsein_deutschland_2016_bf.pdf [Zugriff am: 08.04.2019]
- [25] OBERMEYER PLANEN + BERATEN GmbH, „Unterlagen zum Raumordnungsverfahren: Gutachten G 6.3 Technisches Lärmgutachten - Rolllärmuntersuchung,” München, 2001.
- [26] OBERMEYER PLANEN + BERATEN GmbH, „Unterlagen zum Raumordnungsverfahren: Gutachten G 6.4 Technisches Lärmgutachten - Bodenlärmuntersuchung,” München, 2001.
- [27] W. Krebs, „Gutachten: Fluglärmmonitoring Flughafen Frankfurt Main - AP2: Akustik,” Bericht Nr. 422293, Dübendorf, 2003.
- [28] G. Müller und M. Möser, *Beurteilung von Schallimmissionen: Gesetze - Vorschriften - Normen - Richtlinien*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2017.
- [29] B. Günther, K. H. Hansen und I. Veit, *Technische Akustik - ausgewählte Kapitel: Grundlagen, aktuelle Probleme und Messtechnik*, 8. Aufl. Renningen: Expert, 2008, Vol. 18.
- [30] K. Giering, „Lärmwirkungen: Dosis-Wirkungsrelationen,” 2010. [Online]. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/>

- 461/publikationen/3917_0.pdf [Zugriff am: 08.04.2019]
- [31] H. S. Koelega, *Environmental annoyance: characterization, measurement, and control*. Amsterdam: Elsevier, 1987, Vol. 15.
- [32] M. Bullinger und M. Meis, „Wirkung von Umweltbelastungen auf psychische Funktionen,” in *Handbuch des Umweltschutzes und der Umweltschutztechnik*, H. Brauer, Hrsg. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 1997, S. 786–822.
- [33] D. Schreckenberg, M. Meis, C. Kahl, C. Peschel und T. Eikmann, „Aircraft noise and quality of life around Frankfurt Airport,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, Vol. 7, Nr. 9, S. 3382–3405, 2010.
- [34] J. Quehl und M. Basner, „Annoyance from nocturnal aircraft noise exposure: Laboratory and field-specific dose-response curves,” *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 26, Nr. 2, S. 127–140, 2006.
- [35] R. Guski, „Personal and social variables as co-determinants of noise annoyance,” *Noise & Health*, Vol. 1, Nr. 3, S. 45–56, 1999.
- [36] J. M. Fields, „Effect of personal and situational variables on noise annoyance in residential areas,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 93, Nr. 5, S. 2753–2763, 1993.
- [37] R. Guski, „Moderatoren der Lärmwirkungen,” in *Beeinträchtigung der Gesundheit durch Verkehrslärm*, Berlin, 2000, S. 9–11.
- [38] R. Guski, *Wahrnehmung: Eine Einführung in die Psychologie der menschlichen Informationsaufnahme*, 2. Aufl. Stuttgart: W. Kohlhammer, 2000, Vol. 556.
- [39] R. Guski, „Psychische Wirkungen von Umweltfaktoren,” in *Handbuch der Umweltmedizin*, H. E. Wichmann, H. W. Schlipköter und G. Fülgraf, Hrsgg. Landsberg/Lech: Ecomed, 1997.
- [40] *Wirkung von Verkehrsgeräuschen: Kenngrößen beim Einwirken mehrerer Quellenarten*, VDI 3722-2:2013-05, 2013.
- [41] R. Lerch, G. M. Sessler und D. Wolf, *Technische Akustik: Grundlagen und Anwendungen*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2009.
- [42] B. Stauder, „Studie zur Wahrnehmbarkeit und zu potentiellen Auswirkungen des Bodenlärms am Flughafen Frankfurt,” Masterarbeit, Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2015.
- [43] H. Ising, C. A. Sust und E. Rebentisch, „Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse: Lärmbeurteilung - Extra-aurale Wirkungen. Auswirkungen von Lärm auf Gesundheit, Leistung und Kommunikation,” Dortmund, 1996.
- [44] P. Atteslander, *Methoden der empirischen Sozialforschung*, 13. Aufl. Berlin: Walter de Gruyter Verlag, 2010.
- [45] R. Schnell, P. B. Hill und E. Esser, *Methoden der empirischen Sozialforschung*, 9. Aufl. München: Oldenbourg Verlag, 2011.
- [46] L. Berekoven, W. Eckert und P. Ellenrieder, *Marktforschung: Methodische Grundlagen und praktische Anwendung*, 8. Aufl. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1999.
- [47] J. M. Fields, R. G. de Jong und T. Gjestland, „Standardized general-purpose noise reaction questions for community noise surveys: research and recommendation,” *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 242, Nr. 4, S. 641–679, 2001.
- [48] K. Zimmer und W. Ellermeier, „Psychometric properties of four measures of noise sensitivity: a comparison,” *Journal of Environmental Psychology*, Vol. 19, Nr. 3, S. 295–302, 1999.
- [49] R. Schuemer und D. Schreckenberg, „Änderung der Lärmbelastigung bei maßnahme-bedingter, stufenweise veränderter Geräuschbelastung: Hinweise auf einige Befunde und Interpretationsansätze,” *Zeitschrift für Lärmbekämpfung*, Nr. 47,

- S. 134–143, 2000.
- [50] K. Sommerfeld, „Dauerhaft zufrieden leben mit dem Flughafen als Nachbarn - was würde wirklich helfen?“ Masterarbeit, Institut für Psychologie, Technische Universität Darmstadt, Darmstadt, 2013.
 - [51] K. Zimmer und W. Ellermeier, „Ein Kurzfragebogen zur Erfassung der Lärmempfindlichkeit,“ *Umweltpsychologie*, Nr. 2, S. 54–63, 1998.
 - [52] Fraport AG, „Fluglärm reduzieren: Bericht über den Schallschutz am Flughafen Frankfurt - Winterflugplan 2014/2015,“ 2015.
 - [53] J. Bortz und N. Döring, *Forschungsmethoden und Evaluation: Für Human- und Sozialwissenschaftler; mit 87 Tabellen*, 4. Aufl., Serie Springer-Lehrbuch. Berlin, Heidelberg: Springer Medizin Verlag, 2006.
 - [54] W. Kohn, *Statistik: Datenanalyse und Wahrscheinlichkeitsrechnung*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2005.
 - [55] D. Schreckenbergs und M. Meis, „Lärmbelästigung und Lebensqualität in der Bevölkerung am Frankfurter Flughafen,“ *Lärmbekämpfung*, Nr. 6, S. 225–235, 2007.
 - [56] Fraport AG, „Messbericht über Fluggeräusche in der Stadt Mörfelden-Walldorf,“ 2015.
 - [57] Statistisches Bundesamt, *Pressemitteilung vom 13. Juni 2017 - 197/17: Altersdurchschnitt der Bevölkerung sank 2015 auf 44 Jahre und 3 Monate*, Wiesbaden, 2017.
 - [58] *Messung von Verkehrsgerauschen*, DIN 45642:2004-06, 2004.
 - [59] *Akustik: Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen – Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 2 für ein im Wesentlichen freies Schallfeld über einer reflektierenden Ebene*, DIN EN ISO 3744:2011-02, 2011.
 - [60] *Akustik: Bestimmung der Schallleistungs- und Schallenergiepegel von Geräuschquellen aus Schalldruckmessungen - Hüllflächenverfahren der Genauigkeitsklasse 3 über einer reflektierenden Ebene*, DIN EN ISO 3746:2011-03, 2011.
 - [61] Microtech Gefell GmbH, „Kondensator-Messmikrofonkapsel MK 255,“ 2011. [Online]. Verfügbar: http://www.microtechgefell.de/dmdocuments/MK%20255_deu.pdf [Zugriff am: 07.11.2018]
 - [62] Microtech Gefell GmbH, „1/2" Messmikrofonvorverstärker MV 210,“ 2005. [Online]. Verfügbar: <http://www.microtechgefell.de/dmdocuments/MV210.pdf> [Zugriff am: 07.11.2018]
 - [63] *Elektroakustik: Schallkalibratoren (IEC 60942:2017)*, DIN EN IEC 60942:2018-07, 2018.
 - [64] PCB Synotech GmbH, „CAL200 Akustischer Präzisionskalibrator,“ 2015. [Online]. Verfügbar: https://www.synotech.de/produkte_skript/downloads/marketing/SYN_CAL200_Mikrofonkalibrator_Produktinformation_DEU.pdf [Zugriff am: 20.03.2018]
 - [65] SINUS Messtechnik GmbH, „Soundbook: Handbuch Akustikmesssystem Soundbook MK2,“ 2013.
 - [66] Nielsen-Kellerman Co. Kestrel 4500 Weather Meter. [Online]. Verfügbar: <https://kestrelmeters.com/products/kestrel-4500-weather-meter> [Zugriff am: 20.03.2018]
 - [67] Leuze electronic, „LS 96 Einweg-Lichtschranken,“ 2012. [Online]. Verfügbar: [http://www.leuze.de/de/deutschland/produkte/schaltende_sensoren/optische_sensoren/lichtschranken_lichttaster_kubisch/baureihe_96/einweg_lichtschranken_40/l96_4/selector.php?supplier_aid=50031651&grp_id=1392989065905&lang=deu#{\"tab\":\"3\"}](http://www.leuze.de/de/deutschland/produkte/schaltende_sensoren/optische_sensoren/lichtschranken_lichttaster_kubisch/baureihe_96/einweg_lichtschranken_40/l96_4/selector.php?supplier_aid=50031651&grp_id=1392989065905&lang=deu#{\) [Zugriff am: 07.11.2018]

-
- [68] *Messverfahren für das von beschleunigten Straßenfahrzeugen abgestrahlte Geräusch: Verfahren der Genauigkeitsklasse 2 – Teil 1: Fahrzeuge der Klassen M und N*, DIN ISO 362-1:2009-07, 2009.
- [69] *Anwendung statistischer Methoden bei der Kennzeichnung schwankender Geräuschemissionen*, VDI 3723-1:1993-05, 1993.
- [70] *Akustik: Bahnanwendungen - Messung der Geräuschemission von spurgebundenen Fahrzeugen*, DIN EN ISO 3095:2014-07, 2014.
- [71] *Messung und Beurteilung von Fluggeräuschen*, DIN 45643:2011-02, 2011.
- [72] G. Müller und M. Möser, *Taschenbuch der Technischen Akustik*, 3. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2004.
- [73] H. Fastl und E. Zwicker, *Psychoacoustics: Facts and models*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007, Vol. 22.
- [74] „Erste Verordnung über die Datenerfassung und das Berechnungsverfahren für die Festsetzung von Lärmschutzbereichen vom 27. Dezember 2008. Anlage 1: Anleitung zur Datenerfassung über den Flugbetrieb (AzD),“ in *Bundesanzeiger 195a*, 2.
- [75] F. J. Gruber und R. Joeckel, *Formelsammlung für das Vermessungswesen*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [76] S. Reil, „Ermittlung der akustischen Parameter von Hilfsturbinen (APU) bei Flugzeugen am Flughafen Frankfurt Main durch geeignete Erhebung von Daten sowie Durchführung einer Schallausbreitungsberechnung,“ Bachelorarbeit, Fachhochschule Bingen, Bingen, 2010.
- [77] M. Rabe, S. Spieckermann und S. Wenzel, *Verifikation und Validierung für die Simulation in Produktion und Logistik: Vorgehensmodelle und Techniken*. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2008.
- [78] *Simulation von Logistik-, Materialfluss- und Produktionssystemen: Begriffe*, VDI 3633:2018-05, 2018.
- [79] O. Balci, „Verification, Validation, and Testing,“ in *Handbook of Simulation: : Principles, Methodology, Advances, Applications, and Practice*, J. Banks, Hg., 1998 Aufl., New York: John Wiley & Sons Inc, 2007, S. 335–393.
- [80] W. L. Oberkampf und C. J. Roy, *Verification and Validation in Scientific Computing*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- [81] Umweltbundesamt, „Dokumente für Teilnehmer am AzB 08-Überprüfungsverfahren,“ 2017. [Online]. Verfügbar: <https://www.umweltbundesamt.de/dokument/dokumente-fuer-teilnehmer-am-azb-08-0> [Zugriff am: 12.03.2019]
- [82] *Technikbewertung: Begriffe und Grundlagen*, VDI 3780:2000-09, 2000.
- [83] U. v. Reibnitz, *Szenario-Technik: Instrumente für die unternehmerische und persönliche Erfolgsplanung*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 1991.
- [84] J. Gausemeier, A. Fink und O. Schlake, *Szenario-Management: Planen und Führen nach Szenarien*, 2. Aufl., München, Wien, 1996.
- [85] H. Kosow, R. Gaßner, L. Erdmann und B.-J. Luber, „Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien,“ Berlin, 2008. [Online]. Verfügbar: https://www.izt.de/fileadmin/publikationen/IZT_WB103.pdf [Zugriff am: 02.03.2019]
- [86] D. Mietzner, *Strategische Vorausschau und Szenarioanalysen*. Wiesbaden: Gabler Verlag, 2009.
- [87] Europäische Union, „Richtlinie 2002/49/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 25. Juni 2002 über die Bewertung und Bekämpfung von Umgebungslärm,“ in *ABl. Nr. L 189*, 2002, S. 12–25.

-
- [88] „Vierunddreißigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Lärmkartierung): 34. BImSchV“ in *Bundesgesetzblatt*, 2006, S. 516–518.
- [89] B. Weninger, „Lärmkarten zur Öffentlichkeitsbeteiligung: Analyse und Verbesserung ausgewählter Aspekte der kartografischen Gestaltung“, Dissertation, HafenCity Universität Hamburg, Hamburg, 2015.
- [90] *Akustik: Thematische Karten im Bereich des Schallimmissionsschutzes*, DIN 45682 Entwurf:2016-06, 2016.
- [91] Fraport AG, „Bericht der Fraport AG an die Fluglärmmmission (247. Sitzung),“ 2018. [Online]. Verfügbar: http://www.flk-frankfurt.de/eigene_dateien/sitzungen/247_sitzung_am_26.9.2018/top_8a_schriftlicher_bericht_der_fraport_ag_zur_247_flk-sitzung_korrigiert_stand_10.10.2018.pdf [Zugriff am: 10.04.2019]
- [92] *Gesetz zum Schutz gegen Fluglärm in der Fassung der Bekanntmachung vom 31. Oktober 2007 (BGBl. I S. 2550): FlulärmG*, 2007.
- [93] *Sechzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verkehrslärmschutzverordnung): 16. BImSchV*, 1990. [Online]. Verfügbar: https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_16/16_BImSchVpdf [Zugriff am: 09.04.2019]
- [94] T. J. Schultz, „Synthesis of social surveys on noise annoyance,” *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 64, Nr. 2, S. 377–405, 1978.
- [95] S. Namba und S. Kuwano, „Continuous judgements of noise events: Contributions to psychological acoustics,” in *Results of the 5th Oldenburg Symposium on Psychological Acoustics*, 1991, S. 217–226.
- [96] H. W. Schlipköter und J. Kastka, „Zum Zusammenhang zwischen Schallmessungen und Lärmbelastungsreaktion im Rahmen des Großversuchs Verkehrsberuhigung in Wohngebieten von NRW,” 1979.
- [97] *Mittelung von Schallpegeln*, DIN 45641:1990-06, 1990.
- [98] Fraport AG, „Ab- und Anflugrouten am Frankfurter Flughafen bei Betriebsrichtung 25 (Westbetrieb),“ 2011.
- [99] Deutscher Fluglärmdienst e. V. [Online]. Verfügbar: www.dfld.de [Zugriff am: 25.10.2018]
- [100] M. Möser, *Technische Akustik*, 7. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2007.
- [101] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch Lärm und Vibrationen (Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung): LärmVibrationsArbSchV*, 2007. [Online]. Verfügbar: https://www.gesetze-im-internet.de/l_rmvrationsarbschv/L%C3%A4rmVibrationsArbSchVpdf [Zugriff am: 16.03.2018]
- [102] Boeing Commercial Airplanes, „737 - Airplane Characteristics for Airport Planning: D6-58325-6,” 2013. [Online]. Verfügbar: <https://www.boeing.com/resources/boeingdotcom/commercial/airports/acaps/737.pdf> [Zugriff am: 26.01.2019]
- [103] G. R. Sinambari und S. Sentpali, *Ingenieurakustik*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [104] *Uncertainty of measurement - Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*, ISO/IEC Guide 98-3:2008, 2008.
- [105] Testo Industrial Services GmbH, „Messunsicherheitsfibel: Praxisgerechte Bestimmung von Messunsicherheiten nach GUM (bei Kalibrierungen),“ 2013. [Online]. Verfügbar: http://download.testotis.de/files/at/fibeln/at_messunsicherheitsbestimmung_nach_gum.pdf [Zugriff am: 12.01.2019]

-
- [106] International Civil Aviation Organization (ICAO), „Airport Air Quality Manual: Doc 9889,” Montréal, 2011.



A Anhang zu Kapitel 3

A.1 Fragebogen zur Anwohnerbefragung



Anwohner-Fragebogen

Technische Universität Darmstadt
Institut für Flugsysteme und Regelungstechnik

Liebe Teilnehmerin, Lieber Teilnehmer,

vielen Dank, dass Sie sich dazu entschieden haben als Proband an dieser Forschungsarbeit der Technischen Universität Darmstadt teilzunehmen. Ziel dieser Studie ist es die Wahrnehmbarkeit von Bodenlärm am Flughafen Frankfurt und dessen potenzielle Auswirkungen zu untersuchen. Mit Ihrer Teilnahme leisten Sie einen wichtigen Beitrag, um dieses Forschungsvorhaben erfolgreich durchzuführen.

Alle Ihre Angaben werden anonym erhoben, nicht an Dritte weitergegeben und ausschließlich für diese Forschungsarbeit verwendet.

Antworten Sie bitte auf alle Fragen vollständig, spontan und nach Ihrer eigenen Meinung. Kreuzen Sie bitte das an, was am ehesten auf Sie zutrifft. Es gibt keine richtigen oder falschen Antworten. Das Ausfüllen des Fragebogens nimmt etwa 10-15 Minuten in Anspruch.

Nach der vollständigen Beantwortung dieses Fragebogens besteht für Sie die Möglichkeit an einer Verlosung von 2x20 € Amazon-Gutscheinen teilzunehmen. (Rechtsweg ausgeschlossen)

Benjamin Stauder

Im Folgenden werden die Begriffe **Bodenlärm** und **Fluglärm** unterschieden. Lesen Sie die Definitionen bitte sorgfältig durch, um den Unterschied zwischen beiden Begriffen zu kennen.

Bodenlärm umfasst alle direkt am Flughafen entstehenden Geräusche, besonders durch Abfertigungsvorgänge von Flugzeugen vor dem Start und nach der Landung, oder Triebwerksgeräusche sowohl stehender, als auch rollender Flugzeuge auf dem Vorfeld. Hierzu zählen auch Triebwerksprobeläufe oder etwa der Umkehrschub und die Bremsgeräusche nach der Landung.

Fluglärm umfasst lediglich die von fliegenden Flugzeugen ausgehenden Geräusche beispielsweise während Start und Landung. Der Fluglärm entsteht eher punktuell, etwa durch einen Überflug oder ein vorbeifliegendes Flugzeug.

Zunächst geht es um Ihr **Wohnumfeld**. Die folgenden Fragen beziehen sich auf ihre **letzten 12 Monate als Anwohner ihres aktuellen Wohnortes**. Falls Sie noch keine 12 Monate hier wohnen, beziehen Sie die Fragen auf die gesamte Wohndauer Ihres aktuellen Wohnortes. Kreuzen Sie die Antwortmöglichkeiten an, die **Ihrer Meinung nach** am besten auf Sie zutrifft.

| | | äußerst | stark | mittel- mäßig | etwas | überhaupt nicht |
|-----|---|---------|-------|------------------|-------|-----------------|
| 1.a | Wie stark haben Sie sich in den letzten 12 Monaten hier bei Ihnen zuhause durch Bodenlärm des Frankfurter Flughafens insgesamt gestört oder belästigt gefühlt? | | | | | |
| 1.b | Wie stark löst der Bodenlärm Gefühle wie Verärgerung, Missfallen, Unbehagen oder Unzufriedenheit bei Ihnen aus? | | | | | |
| 1.c | Wie stark löst der Bodenlärm emotionalen Stress (Ängste, Aggressionen) bei Ihnen aus? | | | | | |

Anwohner-Fragebogen

| | | äußerst | stark | mittel- mäßig | etwas | überhaupt nicht |
|-----|--|---------|-------|------------------|-------|-----------------|
| 1.d | Für wie vermeidbar halten Sie den Bodenschall? | | | | | |
| 1.e | Verglichen mit Flugschall, als wie belästigend empfinden Sie den Bodenschall? | | | | | |
| 1.f | Wie stark führt der Bodenschall dazu, dass Sie sich daheim abschotten (z.B. Fenster geschlossen halten, Garten-/Balkonnutzung einschränken)? | | | | | |
| 1.g | Wie sehr macht es Ihnen mit Blick auf den Bodenschall etwas aus neben dem Flughafen zu wohnen? | | | | | |

| | | |
|-----|---|--|
| 2.a | In welcher Stadt wohnen Sie? | Stadt: _____ PLZ: _____ |
| 2.b | Wie lange wohnen Sie in Ihrer/Ihrem aktuellen Wohnung/Haus? | <input type="text"/> Jahre und <input type="text"/> Monate |
| 2.c | Bezogen auf die letzten 12 Monate: Wie viele Stunden verbringen Sie im Schnitt täglich zu Hause ? | <input type="text"/> Stunden |
| 2.d | Arbeiten Sie am Flughafen Frankfurt? | <input type="checkbox"/> Ja <input type="checkbox"/> Nein |

Bewerten Sie bitte die folgenden Aussagen über den **Flughafen Frankfurt**. Kreuzen Sie die Antwortmöglichkeiten an, die **Ihrer Meinung nach** am besten zutrifft. Sie dürfen für jede Aussage nur **ein** Kreuzchen vergeben.

| | | Stimme sehr zu | Stimme ziemlich zu | Stimme mittelmäßig zu | Stimme wenig zu | Stimme gar nicht zu |
|-----|--|-------------------|--------------------------|-----------------------------|--------------------|---------------------------|
| 3.a | Der Flughafen ist ein wichtiger Arbeitgeber in der Region. | | | | | |
| 3.b | Der Flughafen ist eine Belastung für die Umwelt. | | | | | |
| 3.c | Der Flughafen ist wichtig für die regionale Wirtschaft. | | | | | |
| 3.d | Der Flughafen stellt eine Belastung für die Menschen der Region dar. | | | | | |
| 3.e | Durch den Flughafen verlieren Grundstücke und Immobilien an Wert. | | | | | |
| 3.f | Der Flughafen schafft viele neue Arbeitsplätze. | | | | | |
| 3.g | Durch die Lärmbelastung des Flughafens werden die Bewohner der Region auf Dauer krank. | | | | | |
| 3.h | Der Flughafen verhilft der Region zu Wohlstand. | | | | | |
| 3.i | Der Flughafen sollte an einen anderen Standort verlagert werden. | | | | | |

Bewerten Sie bitte die folgenden Aussagen. Versuchen Sie sich in die jeweiligen Situationen hineinzuversetzen und antworten Sie spontan. Gehen Sie bitte die Aussagen der Reihe nach durch und lassen Sie keine aus. Kreuzen Sie die Antwortmöglichkeiten an, die **Ihrer Meinung nach** am besten auf Sie zutrifft. Sie dürfen für jede Aussage nur **ein** Kreuzchen vergeben.

| | | Stimmt genau | Stimmt eher | Stimmt eher nicht | Stimmt gar nicht |
|-----|---|-----------------|----------------|----------------------|---------------------|
| 4.a | Sich unterhalten macht keinen Spaß, wenn nebenbei das Radio läuft. | | | | |
| 4.b | Ich bemerke störende Lärmquellen später als andere. | | | | |
| 4.c | Ich vermeide laute Freizeitveranstaltungen, wie z.B. Fußballspiele oder Jahrmärkte. | | | | |
| 4.d | Ich wache beim geringsten Geräusch auf. | | | | |
| 4.e | Ich kann auch in lauter Umgebung schnell und konzentriert arbeiten. | | | | |
| 4.f | Wenn ich in der Stadt bin und einkaufe, überhöre ich den Straßenlärm. | | | | |
| 4.g | Nach einem Abend in einem lauten Lokal fühle ich mich wie ausgelaugt. | | | | |
| 4.h | Wenn ich einschlafen will stört mich kaum ein Geräusch. | | | | |
| 4.i | Am Wochenende bin ich gerne an ruhigen Orten. | | | | |

Zum Schluss möchte ich Sie nun noch um einige soziodemografische Angaben bitten. Diese Daten werden vertraulich behandelt und nur im Rahmen dieser Forschungsarbeit zur Auswertung der Inhalte genutzt. Ihre Anonymität ist dabei jederzeit gewährleistet.

Geschlecht

- ☐ weiblich
☐ männlich

Wie alt sind Sie?

Was ist Ihr höchster Bildungsabschluss?

- ☐ Noch Schüler
☐ Kein Schulabschluss
☐ Volks-/ Hauptschulabschluss
☐ Realschulabschluss / Mittlere Reife
☐ Fachabitur / Fachhochschulreife
☐ Abitur / Hochschulreife
☐ Hochschulabschluss (FH, HS, Uni)
☐ Sonstiges, und zwar:

Welcher Beschäftigung gehen Sie momentan überwiegend nach?

- ☐ Schüler/in
☐ Bundesfreiwilligendienst (auch FSJ, FÖL, o.ä.)
☐ Auszubildende/r
☐ Student/in
☐ Angestellte/r
☐ Beamte/r
☐ Selbstständige/r
☐ Arbeitssuchende/r
☐ Hausfrau/Hausmann
☐ Rentner/ in
☐ Sonstiges, und zwar:

Vielen herzlichen Dank für Ihre Teilnahme!

Falls Sie den Fragebogen vollständig ausgefüllt haben können Sie nun freiwillig an der Verlosung von 2x20 € Amazon-Gutscheinen teilnehmen. Hierzu tragen Sie in das folgende Feld lesbar ihre Emailadresse ein. Falls Sie ausgelost wurden, werden Sie darüber über Ihren Gewinn benachrichtigt.

A.2 Vergleich von Messwerten zur Auswahl der Stichprobe

Die von den DFLD-Messstationen Kelsterbach 3 (Stadtkern) und Kelsterbach 4 (Stadtrand) gemessenen Schalldruckpegel sind in Tabelle A.1 und Tabelle A.2 dargestellt. Die Messwerte stehen als energieäquivalenter Dauerschallpegel $L_{eq}(3)$ ¹ zur Verfügung. Für den Vergleich wird der Dauerschallpegel des gesamten Tages verwendet. Da tagsüber mit vermehrtem Verkehrs- und Fluglärm zu rechnen ist, wird zusätzlich der Dauerschallpegel der Kernnacht während des Nachtflugverbots herangezogen (23 Uhr bis 5 Uhr). Anlässlich dieser Werte wird die Annahme verstärkt, dass es im Stadtkerngebiet durch größere Abschirmung und Distanz zum Flughafen zu einer geringeren Bodenlärmbelastung kommt als im Stadtrandgebiet. Ebenfalls aus Tabelle A.1 und Tabelle A.2 entnehmbar sind die Dauerschallpegel, die durch detektierte Überflüge zustande kommen und damit dem Fluglärm zuzuordnen sind. Die Differenz zwischen dem nur durch Überflüge entstandenen und dem gesamten Dauerschallpegel muss durch weitere Lärmquellen entstanden sein. Verglichen mit den Gebieten entlang der Einflugschneisen ist hier der Fluglärm somit als deutlich geringer einzuschätzen.

Zur Bestimmung der Kontrollgruppe wurde eine Vielzahl von Schalldruckpegelmesswerten von DFLD-Messstationen um den Flughafen untersucht. Vorzugsweise wurde entlang der Flugrouten bei Westbetrieb gesucht, da im jährlichen Durchschnitt zu 70 % der Zeit Westbetrieb vorherrscht und lediglich zu 30 % Ostbetrieb [98]. Die meisten der untersuchten Messwerte erfüllen lediglich einen Teil der aufgestellten Kriterien. Für die Stadt Mörfelden-Walldorf konnte die größte Übereinstimmung ermittelt werden. Tabelle A.3 und Tabelle A.4 zeigen die relevanten Dauerschallpegel der Messstation Mörfelden 1 sowie den Vergleich der registrierten Überflüge. Auch diese Werte beziehen sich auf den Zeitraum von Dezember 2014 bis Juni 2015 in denen durchgängig Messdaten zur Verfügung standen. Die Messstation Mörfelden 1 weist sowohl anhand des durch Überflüge erzeugten Dauerschallpegels als auch anhand der Kernnacht und des gesamten Dauerschallpegels die ähnlichsten Werte aller untersuchten Stationen verglichen mit der Station Kelsterbach 3 auf. Insgesamt sind die Dauerschallpegel auf einem etwas niedrigeren Niveau angesiedelt. Dies könnte sich durch die schwächer ausfallende Kombination aus Flug- und Bodenlärm ergeben. Auch die Anzahl der erkannten Überflüge

¹ Der Äquivalenz- oder Halbierungsparameter q gibt an, welche Pegeländerung einer Verdoppelung oder Halbierung der Wirkzeit eines konstanten Pegels äquivalent sein soll. International üblich ist $q = 3$, das entspricht der Energieäquivalenz. Beim Prinzip der Energieäquivalenz wird davon ausgegangen, dass die mittlere Schallenergie eines diskontinuierlichen Geräusches in einem Zeitraum T die gleiche Wirkung hat, wie die eines kontinuierlichen Geräusches gleicher Energie. [97]

ähneln sich denen in Kelsterbach, weshalb auf eine ähnliche Fluglärmbelastung an beiden Orten geschlossen wird.

Tabelle A.1.: Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A). Station Kelsterbach 3 (Stadtkern) für den Zeitraum Dezember 2014 bis Juni 2015 aus [99].

| Monat | Nur Überflüge | Kernnacht | Gesamt |
|----------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) | $L_{Kernnacht}$ (23 - 5 Uhr) | $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) |
| Dezember | 43,2 | 52,9 | 58,0 |
| Januar | 39,5 | 61,1 | 59,1 |
| Februar | 40,4 | 50,6 | 56,6 |
| März | 42,2 | 56,4 | 58,5 |
| April | 39,8 | 50,8 | 58,7 |
| Mai | 39,4 | 53,7 | 57,2 |
| Juni | 42,9 | 51,6 | 58,1 |
| Ø | 41,3 | 55,6 | 58,1 |

Tabelle A.2.: Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A). Station Kelsterbach 4 (Stadtrand) für den Zeitraum Dezember 2014 bis Juni 2015 aus [99].

| Monat | Nur Überflüge | Kernnacht | Gesamt |
|----------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|
| | $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) | $L_{Kernnacht}$ (23 - 5 Uhr) | $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) |
| Dezember | 46,2 | 55,8 | 61,0 |
| Januar | 45,7 | 59,3 | 61,6 |
| Februar | 47,7 | 55,4 | 61,0 |
| März | 46,6 | 55,8 | 60,8 |
| April | 46,5 | 54,2 | 59,4 |
| Mai | 41,9 | 61,9 | 62,3 |
| Juni | 43,5 | 73,6 | 73,4 |
| Ø | 45,8 | 65,8 | 66,3 |

Tabelle A.3.: Äquivalenter Dauerschallpegel in dB(A). Station Mörfelden 1 für den Zeitraum Dezember 2014 bis Juni 2015 aus [99].

| Monat | Nur Überflüge $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) | Kernnacht $L_{Kernnacht}$ (23 - 5 Uhr) | Gesamt $L_{eq}(3)$ (0 - 24 Uhr) |
|----------|---|---|------------------------------------|
| Dezember | 38,0 | 52,4 | 55,8 |
| Januar | 37,4 | 54,6 | 56,4 |
| Februar | 36,7 | 47,8 | 53,5 |
| März | 36,8 | 51,0 | 55,5 |
| April | 37,5 | 48,5 | 53,3 |
| Mai | 36,6 | 47,3 | 53,3 |
| Juni | 39,0 | 46,6 | 52,7 |
| Ø | 37,5 | 50,7 | 54,6 |

Tabelle A.4.: Anzahl der von den Messstationen Mörfelden 1 und Kelsterbach 3 erkannten Überflüge aus [99].

| Monat | Mörfelden 1 | Kelsterbach 3 |
|----------|-------------|---------------|
| Dezember | 351 | 403 |
| Januar | 294 | 442 |
| Februar | 327 | 304 |
| März | 330 | 499 |
| April | 412 | 324 |
| Mai | 437 | 344 |
| Juni | 556 | 262 |
| Ø | 386,7 | 368,3 |

B Anhang zu Kapitel 4

B.1 Anforderungen an die akustischen Messungen

Tabelle B.1.: Detaillierung der Anforderungskategorien für die akustischen Messungen (Anforderungsliste).

| Nr. | Anforderung | Quelle |
|--------|---|------------------|
| 1. | Messequipment | |
| 1.1. | Messmikrofonkapsel | |
| 1.1.1. | Leistungsklasse 1 | [22, 68, 58, 71] |
| 1.1.2. | ½“-Kondensatormikrofon aufgrund der Genauigkeitsanforderungen | [100, S. 355] |
| 1.1.3. | Freifeldmikrofon | [22] |
| 1.2. | Messmikrofonvorverstärker | |
| 1.2.1. | Leistungsklasse 1 | [22, 68, 58, 71] |
| 1.2.2. | Stromgespeist (Anschluss über BNC ¹ -Kabel) | |
| 1.2.3. | Gewinde kompatibel zur Messmikrofonkapsel | |
| 1.2.4. | Eingebauter Speicher zur Mikrofonidentifizierung (TEDS ²) | |
| 1.3. | Mikrofonhalter | |
| 1.3.1. | ½“-Schelle kompatibel zum Messmikrofonvorverstärker | |
| 1.4. | Windschirm | |
| 1.4.1. | Leistungsklasse 1 | [22, 68, 58, 71] |
| 1.5. | Schallkalibrator | |
| 1.5.1. | Leistungsklasse 1 | [22, 68, 58, 71] |
| 1.5.1. | Einfache Handhabung | |

¹ Bayonet Neill Concelman (BNC)

² Transducer Electronic Data Sheet (TEDS)

| | | |
|---------|---|----------------------------|
| 1.6. | <i>Messrechner und Soundkarte</i> | |
| 1.6.1. | Erweiterbares System (z. B. weitere Mikrofone) | |
| 1.6.2. | Wetterfest/-geschützt | |
| 1.6.3. | Robust | |
| 1.6.4. | Mobil | |
| 1.6.5. | Lange Akkulaufzeit (> 6 h ohne externe Stromversorgung) | |
| 1.6.6. | Einsatz von Triggern möglich, automatisierte Aufzeichnung von Messdaten | |
| 1.6.7. | Benutzerfreundlich | |
| 1.6.8. | Direkte und visuelle Auswertung | |
| 1.6.9. | Daten in andere Formate exportierbar (Weiterverarbeitung z. B. in MATLAB) | |
| 1.6.10. | Durchführung von Frequenzanalysen bspw. mittels FFT ³ | |
| 1.6.11. | Zeitbewertung „F“, Frequenzbewertung „A“ | [68] |
| 1.7. | <i>Kabel</i> | |
| 1.7.1. | Leistungsklasse 1 | [22, 68, 58, 71] |
| 1.7.2. | Wetterfest | |
| 1.7.3. | BNC-Anschluss | |
| 1.7.4. | Kabellänge muss geeignet sein, um ein Messfenster von mind. 100 m Länge abzudecken (entspricht der dreifachen Länge des Flugzeug-Schlepper-Gespans) | |
| 1.8. | <i>Lichtschraken</i> | |
| 1.8.1. | Blendefahr für Piloten und Schlepperfahrer vermeiden | Experten- gespräch LEOS |
| 1.8.2. | Betriebsreichweite > 60 m (aufgrund des einzuhaltenden Sicherheitsabstands) | |
| 1.8.3. | Schnell aufzubauen | |
| 1.8.4. | Geeignet für den Außeneinsatz | |
| 1.9. | <i>Wetterstation</i> | |
| 1.9.1. | Erfassung von Daten zur Windrichtung, Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur und Luftfeuchtigkeit | [71] |
| 1.9.2. | Hinreichende Messgenauigkeit | |
| 1.9.3. | Mobil einsetzbar | |

³ Fast Fourier Transformation (FFT)

| | | |
|---------|--|--------------|
| 1.10. | <i>Laser-Entfernungsmesser</i> | |
| 1.10.1. | Messbereich bis mind. 60 m | |
| 1.10.2. | Klein und handlich | |
| 1.11. | <i>Stative</i> | |
| 1.11.1. | Geeignet für eine Messhöhe von 1,2 m | [68, 58] |
| 1.11.2. | Stabil | |
| 1.11.3. | Portabel | |
| 1.12. | <i>Stromversorgung</i> | |
| 1.12.1. | Gewährleistung der Stromversorgung der Laserlichtschranken | |
| 1.12.2. | Leicht, klein und flexibel einsetzbar | |
| 1.12.3. | Lange Einsatzdauer | |
| 1.13. | <i>Tisch für Messequipment</i> | |
| 1.13.1. | Abmaße geeignet zum Aufstellen in einem Kleinbus | |
| 1.13.2. | Portabel und zusammenklappbar | |
| 2. | Prüfverfahren | |
| 2.1. | Reproduzierbare und repräsentative Bedingungen | [59] |
| 2.2. | Abbildung verschiedener Testkonfigurationen (z. B. AETO, DT, Schlepper im Leerlauf) | |
| 2.3. | Messsetup in kurzer Zeit auf- und abbaubar | |
| 2.4. | Mikrofonposition: Horizontaler Abstand zur Mitte des Fahrstreifens von $(7,5 \pm 0,05)$ m und in $(1,2 \pm 0,02)$ m Höhe über der Fahrbahnoberfläche | [68, 58] |
| 2.5. | Bezugsachse des Mikrofons muss horizontal und senkrecht zum Weg der Testkonfiguration ausgerichtet sein | [68, 58] |
| 2.6. | Messdauer muss mindestens die Zeit umfassen, in der der Schalldruckpegel den maximalen Vorbeifahrtpegel um weniger als 10 dB unterschreitet | [68] |
| 3. | Prüfgelände, Messumgebung | |
| 3.1. | Schallhart und eben | [68, 59] |
| 3.2. | Trockene Fahrbahnoberfläche | [68] |
| 3.3. | Frei von reflektierenden Gegenständen | [68, 58, 59] |
| 3.4. | Die das Messgerät ablesende Person darf die Messung nicht verfälschen | [68] |

| | | |
|------|---|--------------------------------|
| 3.5. | Messungen unter Freifeldbedingungen über einer reflektierenden Ebene | [59] |
| 3.6. | Fremdgeräusch muss mindestens 10 dB, vorzugsweise 15 dB unter dem Schalldruckpegel der zu untersuchenden Geräuschquelle liegen | [68, 58, 71, 59] |
| 3.7. | Wendemöglichkeit für die Testkonfiguration, um Vorbeifahrten in zwei Richtungen zu ermöglichen | |
| 4. | Meteorologische Bedingungen | |
| 4.1. | $5^{\circ}\text{C} \leq \text{Lufttemperatur} \leq 25^{\circ}\text{C}$ | [68, 71] |
| 4.2. | $30\% \leq \text{Relative Luftfeuchtigkeit} \leq 80\%$ | [68] |
| 4.3. | Windgeschwindigkeit $\leq 5 \text{ m/s}$ | [68, 58, 71] |
| 4.4. | Kein Niederschlag | [68, 58] |
| 5. | Operationelle Anforderungen, Rahmenbedingungen | |
| 5.1. | Keine Behinderung / Beeinflussung des laufenden Betriebs | Fraport AG |
| 5.2. | Falls Messungen nachts stattfinden, liegt der nutzbare Zeitraum dafür zwischen 23 Uhr und 05 Uhr (während des Nachtflugverbots) | Fraport AG |
| 5.3. | Laufende Triebwerke nur bis 24 Uhr (Genehmigung des HMWEVL ⁴ erforderlich) | HMWEVL |
| 5.4. | Einfache und schnelle Kommunikation mit Pilot und Schlepperfahrer | |
| 5.5. | Zugangsberechtigung für das Vorfeld erforderlich | Fraport AG |
| 6. | Sicherheit | |
| 6.1. | Ausreichender Abstand des Messequipments und Personen zum Flugzeug, um Gefährdung durch Triebwerkstrahl zu vermeiden | Fraport AG, Flugzeughersteller |
| 6.2. | Tragen von Gehörschutz | [101] |
| 6.3. | Keine Gegenstände auf dem Prüfgelände hinterlassen | Fraport AG |
| 6.4. | Ausreichende Beleuchtung der Messumgebung | |
| 6.5. | Hilfsmarkierungen auf dem Boden müssen nach den Messungen leicht entfernbar sein | Fraport AG |
| 7. | Budget | |
| 7.1. | 20.000 € Budget für Messequipment | |

⁴ Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Energie, Verkehr und Landesentwicklung (HMWEVL)

B.2 Mitnahmeliste Messkampagne

Tabelle B.2.: Mitnahmeliste für die akustische Messkampagne.

| | Anzahl: | Einfuhr: | Ausfuhr: | Vorhanden: |
|--|---------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
| Messequipment: | | | | |
| Soundbook (Panasonic Toughbook) | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Messmikrofon Microtech Gefell Nr. 2935 | 1 | | | |
| +Zubehör (Windschirm, Handbuch) | x | | | |
| Stativ | | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Mikrofonstativ mit Schwenkarm (König & Meyer) | 1 | | | |
| Stativ für Kestrel Wetterstation | 1 | | | |
| HAMA Star 61 Stativ für IR- Lichtschranken | 4 | | | |
| Distanzmesser Bosch GLM-150 | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kestrel 4500 Wetterstation | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kestrel USB Port | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Flügelrad-Anemometer (Windmaster 2) | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Schalldruck-Kalibrator | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kabeltrommel 2 x 70 m Messkabel | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Verteilerbox für Lichtschranken | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Markierungsequipment: | | | | |
| Kreidebox | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Gliedermaßstab | 2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Winkel | 3 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Knicklichter | x | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Sonstiges: | | | | |
| Verlängerungskabel | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Stirnlampen | x | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Kamera | 2 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |
| Gewebeklebeband | 1 | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

| | | | | |
|----------------------------------|---|-----|-----|-----|
| Klemmbretter | 3 | [] | [] | [] |
| Batterien | x | [] | [] | [] |
| Laptop-Ladegerät (+ Kfz-Adapter) | 1 | [] | [] | [] |
| Protokollvorlagen | x | [] | [] | [] |
| Ablaufplan | x | [] | [] | [] |
| Werkzeugausgabe LHT: | | | | |
| Crew-Bus LHT | 1 | | | |
| Licht | | | | |
| Strahler groß, mit Akku | 2 | | | |
| Taschenlampen | 4 | | | |
| Klapptisch | 1 | | | |
| Warnwesten | x | | | |

B.3 Zeitplan Messkampagne

Tabelle B.3.: Zeitlicher Ablaufplan der Messkampagne.

| Uhrzeit | Aktion |
|-------------------|--|
| 17:00 Uhr | Treffen am FSR, TU Darmstadt |
| | Vorbereitung, Besprechung, Equipment einpacken |
| 19:30 Uhr | Abfahrt |
| 20:00 Uhr | Ankunft LHT Gelände |
| | Abholung LHT Ausweise und Abladen des Equipments |
| 20:20 Uhr | Abholung Vorfeldausweise |
| 20:45 Uhr | Ankunft LHT-Gebäude |
| 21:00 Uhr | Briefing Projektteam, Besprechung der Messungen |
| 22:30 Uhr | Fahrzeug abfahrtbereit zum Messbereich |
| 23:00 - 23:30 Uhr | Aufbau und Vorbereitung der Messungen mit Messmethode Vorbeifahrt |
| 23:30 - 02:00 Uhr | Durchführung der Messungen mit Messmethode Vorbeifahrt |
| 02:00 - 02:30 Uhr | Aufbau und Vorbereitung der Messungen mit Messmethode Stand |
| 02:30 - 03:30 Uhr | Durchführung der Messungen mit Messmethode Stand |
| 03:30 - 04:00 Uhr | Abbau Messequipment |
| 05:00 Uhr | Rückfahrt |

B.4 Messprotokolle

Tabelle B.4.: Protokoll der Messnacht vom 12./13. Juni 2013.

| Nr. | Vorbeifahrt-konfig. | Fahrtrichtung (L>R; R>L) | Beginn Messung in hh:mm:ss | Vorbeifahrt-geschw. v_{Pass} | Kommentar |
|-----|--|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------|
| 1 | Vergleichsschlepper einzeln | R>L | 03:25:39 | 20,0 km/h | - |
| 2 | | L>R | 03:27:34 | 22,5 km/h | - |
| 3 | | R>L | 03:30:09 | 21,2 km/h | - |
| 4 | | L>R | 03:31:50 | 21,2 km/h | - |
| 5 | Vergleichsschlepper Stand (Messmethode 2) | | | | |

Tabelle B.5.: Protokoll der Messnacht vom 15./16. Mai 2014.

| Nr. | Vorbeifahrt-konfig. | Fahrtrichtung (L>R; R>L) | Beginn Messung in hh:mm:ss | Vorbeifahrt-geschw. v_{Pass} | Kommentar |
|-----|----------------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------|--|
| 1 | DT (TW an, APU an) | R>L | 00:23:05 | 22,2 kn | - |
| 2 | | L>R | 00:25:15 | 15,9 kn | - |
| 3 | | R>L | 00:29:20 | 22,4 kn | - |
| 4 | | L>R | 00:32:31 | 18,7 kn | - |
| 5 | DT (TW aus, APU an) | R>L | 00:39:29 | 17,6 kn | Um 00:40:00 Uhr die Abdeckung des Anemometers entfernt |
| 6 | | L>R | 00:46:50 | 17,6 kn | |
| 7 | | R>L | 00:49:52 | 17,4 kn | |
| 8 | | L>R | 00:53:11 | 17,6 kn | |
| 9 | AETO B737-500 | R>L | 01:04:05 | 21,6 kn | - |
| 10 | | L>R | 01:06:31 | 18,0 kn | - |
| 11 | | R>L | 01:08:06 | 21,6 kn | - |
| 12 | | L>R | 01:10:51 | 18,1 kn | - |

| | | | | | |
|----|--------------------------------------|-----|----------|-----------|---|
| 13 | TaxiBot | R>L | 02:05:14 | 31,6 km/h | - |
| 14 | einzel | L>R | 02:07:02 | 31,8 km/h | Motor zwischendurch runtergeregelt, Messung verwerfen |
| 15 | | R>L | 02:09:05 | 31,6 km/h | - |
| 16 | | L>R | 02:10:36 | 31,6 km/h | - |
| 17 | | R>L | 02:11:46 | 31,6 km/h | - |
| 18 | | L>R | 02:13:34 | 31,6 km/h | - |
| 19 | TaxiBot Stand (Messmethode 2) | | | | |

B.5 Berechnung des Schalldruckmittlungspegels nach VDI 3723

Die Berechnung des Schalldruckmittlungspegels $L_{x;m}$ erfolgt gemäß VDI-Richtlinie 3723 Blatt 1 [69] nach folgender Gleichung:

$$L_{x;m} = 10 \cdot \lg \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n 10^{0,1 \cdot L_x^{(i)}} \text{ dB} \right) \text{ dB} \tag{B.1}$$

Dazu sind die Messwerte $L_x^{(i)}$ in Gleichung B.1 einzusetzen, wobei n die Anzahl der unabhängigen Messwerte ist.

Die Konventionen für die Ermittlung des Vertrauensbereiches sind so gewählt, dass der Erwartungswert mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,8 im Vertrauensbereich liegt; dies bedeutet, dass der gesuchte Wert der Grundgesamtheit mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,9 unterhalb der oberen Grenze des Vertrauensbereiches bzw. oberhalb der unteren Grenze liegt.

Bei unbekannter Standardabweichung errechnet sich der zweiseitige Vertrauensbereich des Mittelungspegels folgendermaßen:

$$L_o = L_{x;m} + 10 \cdot \lg \left(1 + \frac{Z' \cdot t_{n-1}}{\sqrt{n}} \right) \text{ dB} \tag{B.2}$$

$$L_u = L_{x;m} + 10 \cdot \lg \left(1 - \frac{Z' \cdot t_{n-1}}{\sqrt{n}} \right) \text{ dB} \tag{B.3}$$

mit

$$Z' = s \cdot 10^{-0,1 \cdot L_{x,m} \text{ dB}} \tag{B.4}$$

wobei s die Standardabweichung der bezogenen Schalldruckquadrate

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(10^{0,1 \cdot L_x^{(i)} \text{ dB}} - 10^{0,1 \cdot L_{x,m} \text{ dB}} \right)^2 \tag{B.5}$$

$$\tag{B.6}$$

und t_{n-1} der Studentfaktor⁵ ist.

Tabelle B.6 fasst die für die einzelnen Vorbeifahrtkonfigurationen berechneten Werte zusammen.

Tabelle B.6.: Mittelungspegel der einzelnen Vorbeifahrtkonfigurationen und deren Vertrauensbereich nach VDI Richtlinie 3723 Blatt 1 [69].

| Vorbeifahrt-konfig. | s | Z' | Anzahl n der Mess- werte | t_{n-1} | L_u in dB(A) | L_m in dB(A) | L_o in dB(A) |
|------------------------------------|-------------------|------|----------------------------------|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|
| AETO B737-500 | $L_{p,A,E}$ | | | | | | |
| | $6,18 \cdot 10^9$ | 0,19 | 4 | 1,64 | 104,37 | 105,11 | 105,74 |
| | $L_{p,A,E,max}$ | | | | | | |
| | $4,83 \cdot 10^9$ | 0,25 | 4 | 1,64 | 101,85 | 102,85 | 103,66 |
| | $L_{p,A,eq}$ | | | | | | |
| | $2,69 \cdot 10^8$ | 0,11 | 4 | 1,64 | 93,57 | 93,97 | 94,34 |
| DT (TW aus, APU an) | $L_{p,A,E}$ | | | | | | |
| | $1,32 \cdot 10^8$ | 0,08 | 4 | 1,64 | 92,16 | 92,44 | 92,70 |
| | $L_{p,A,E,max}$ | | | | | | |
| | $3,10 \cdot 10^7$ | 0,07 | 4 | 1,64 | 86,02 | 86,29 | 86,54 |
| | $L_{p,A,eq}$ | | | | | | |
| | $9,23 \cdot 10^6$ | 0,08 | 4 | 1,64 | 80,48 | 80,77 | 81,04 |

⁵ Wert zur Berechnung des Vertrauensbereiches bei unbekannter Varianz s^2 für Mittelwerte in Abhängigkeit von der Anzahl n der Messungen und des Vertrauensbereiches [69, S. 14].

| | | | | | | | |
|-------------------------------------|-------------------|------|---|-----------------|--------|--------|--------|
| DT (TW an, APU an) | | | | $L_{p,A,E}$ | | | |
| | $7,34 \cdot 10^9$ | 0,21 | 4 | 1,64 | 104,53 | 105,36 | 106,06 |
| | | | | $L_{p,A,E,max}$ | | | |
| | $2,88 \cdot 10^9$ | 0,15 | 4 | 1,64 | 102,17 | 102,76 | 103,27 |
| Vergleichs- schlepper einzeln | | | | $L_{p,A,eq}$ | | | |
| | $2,19 \cdot 10^8$ | 0,08 | 4 | 1,64 | 93,80 | 94,11 | 94,40 |
| | | | | $L_{p,A,E}$ | | | |
| | $1,52 \cdot 10^7$ | 0,16 | 4 | 1,64 | 79,05 | 79,68 | 80,23 |
| TaxiBot einzeln | | | | $L_{p,A,E,max}$ | | | |
| | $6,87 \cdot 10^6$ | 0,31 | 4 | 1,64 | 72,23 | 73,49 | 74,47 |
| | | | | $L_{p,A,eq}$ | | | |
| | $1,05 \cdot 10^6$ | 0,19 | 4 | 1,64 | 66,65 | 67,39 | 68,03 |
| TaxiBot einzeln | | | | $L_{p,A,E}$ | | | |
| | $1,47 \cdot 10^7$ | 0,24 | 5 | 1,53 | 77,20 | 77,96 | 78,61 |
| | | | | $L_{p,A,E,max}$ | | | |
| | $3,74 \cdot 10^6$ | 0,29 | 5 | 1,53 | 70,21 | 71,16 | 71,93 |
| TaxiBot einzeln | | | | $L_{p,A,eq}$ | | | |
| | $1,18 \cdot 10^6$ | 0,24 | 5 | 1,53 | 66,25 | 67,01 | 67,66 |

B.6 Schalldruckpegel Goldhofer AST-2

Tabelle B.7.: In einer Entfernung von 7,5 m gemessene Vorbeifahrtpegel des Vergleichsschleppers (Goldhofer AST-2). Messung in der Nacht vom 12./13. Juni 2013.

| Messung Nr. | Fahrtrichtung (L>R; R>L) | $L_{p,A,E}$ (7,5 m) in dB(A) | $L_{p,A,E,max}$ (7,5 m) in dB(A) | $L_{p,A,eq}$ (7,5 m) in dB(A) |
|----------------|-----------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|
| 1 | R>L | 88,5 | 81,3 | 75,9 |
| 2 | L>R | 89,5 | 84,4 | 77,5 |
| 3 | R>L | 88,8 | 82,4 | 76,4 |
| 4 | L>R | 90,0 | 83,5 | 77,7 |

B.7 Berechnung der Oktavschalldruckpegel nach AzB

Grundlage für die Berechnung der Oktavschalldruckpegel liefern .xls Dateien, die für jede Vorbeifahrt aus dem Soundbook exportiert werden und Terzpegel in Zeitschritten von $\Delta t = 0,005\text{ s}$ enthalten. In einem ersten Schritt werden für jeden Zeitschritt jeweils drei Terzpegel zu einem Oktavpegel zusammengefasst. Hierzu wird der Summenpegel der drei Terzen gebildet. Auf diese Weise werden acht Oktavschalldruckpegel für die Oktavmittenfrequenzen $n = 63\text{ Hz}$, 125 Hz , 250 Hz , 500 Hz , 1.000 Hz , 2.000 Hz , 4.000 Hz und 8.000 Hz berechnet. Aus diesen acht Oktavschalldruckpegeln wird erneut für jeden Zeitschritt der Summenpegel L_Σ berechnet und der Zeitpunkt $t(L_{\Sigma,\max})$ bestimmt, an dem der höchste Summenpegel $L_{\Sigma,\max}$ während der Vorbeifahrt auftritt. Anhand dieses Zeitpunktes wird der Abstand s der Hauptschallquelle in Bezug zur Mikrofonposition ermittelt. Abbildung B.1 zeigt, wie die Position der Hauptschallquelle definiert ist. Der Abstand s errechnet sich dabei aus dem horizontalen Abstand r zwischen Schallquelle und Mikrofon unter Berücksichtigung der Höhe des Mikrofons über dem Boden h_r sowie der Höhe der Schallquelle über dem Boden h_s mithilfe des Pythagorassatzes $s = \sqrt{r^2 + (h_s - h_r)^2}$. Tabelle B.8 fasst für alle vermessenen Konfigurationen die berechneten Abstände s zusammen. Anschließend werden damit die Oktavschalldruckpegel für eine Bezugsentfernung s_{0n} ermittelt.

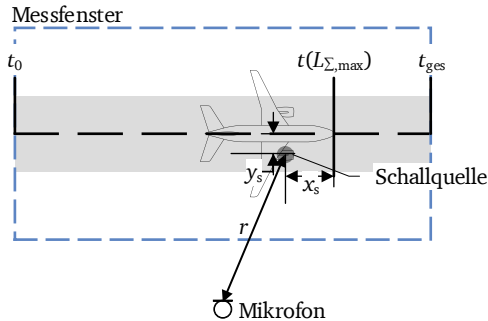


Abbildung B.1.: Position der Hauptschallquelle (hier: Triebwerk) am Beispiel der Vorbeifahrtkonfiguration „AETO B737-500“. [Eigene Darstellung]

Bevor die Oktavschalldruckpegel berechnet werden können, muss untersucht werden, ob die gemessenen Gesamtpegel L_G hinsichtlich eines Stör- bzw. Fremdpegels L_F (Hintergrundgeräusch) korrigiert werden müssen. Dazu wird ein Korrektur-

Tabelle B.8.: Darstellung der einzelnen Vorbeifahrtkonfigurationen, der Position der Hauptschallquelle [102, 14], der Vorbeifahrtgeschwindigkeit v_{pass} , des Zeitpunktes, an dem der über die Oktavmittenfrequenzen summierte Schalldruckpegel maximal wird $t(L_{\Sigma,\text{max}})$, der zu diesem Zeitpunkt zurückgelegten Wegstrecke $s_{\text{pass}}(L_{\Sigma,\text{max}})$ sowie des Abstands s zwischen Schallquelle und Mikrofon.

| Vorbeifahrt- konfiguration | Fahrt- richtung | Position Hauptschallquelle | | | v_{pass} in m/s | $t(L_{\Sigma,\text{max}})$ in s | $s_{\text{pass}}(L_{\Sigma,\text{max}})$ in m | Abstand Schallquelle -Mikrofon s in m |
|--|--------------------|-------------------------------|---------------|---------------|-----------------------------|------------------------------------|--|--|
| | | x_s in m | y_s in m | h_s in m | | | | |
| AETO B737-500 Hauptschallquelle: Triebwerk | R>L | 11,3 | 4,8 | 1,2 | 11,1 | 6,1 | 68,2 | 19,0 |
| | L>R | | | | 9,3 | 7,4 | 68,8 | 19,2 |
| | R>L | | | | 11,1 | 6,1 | 67,8 | 18,8 |
| | L>R | | | | 9,3 | 7,5 | 70,2 | 19,8 |
| DT (TW aus, APU an) Hauptschallquelle: APU | R>L | 31,3 | 0 | 4,2 | 9,1 | 7,1 | 64,3 | 28,3 |
| | L>R | | | | 9,1 | 8,9 | 80,4 | 22,7 |
| | R>L | | | | 8,9 | 7,2 | 64,6 | 28,2 |
| | L>R | | | | 9,0 | 9,3 | 83,9 | 22,8 |
| DT (TW an, APU an) Hauptschallquelle: Triebwerk | R>L | 12,8 | 4,8 | 1,2 | 11,4 | 6,6 | 75,3 | 21,6 |
| | L>R | | | | 8,2 | 9,6 | 78,6 | 23,7 |
| | R>L | | | | 11,5 | 6,5 | 74,4 | 21,1 |
| | L>R | | | | 9,6 | 7,8 | 75,4 | 21,7 |
| TaxiBot einzeln Hauptschallquelle: TaxiBot | R>L | 7,0 | 2,1 | 0,5 | 8,8 | 5,2 | 45,3 | 23,5 |
| | L>R | | | | 8,8 | 10,5 | 92,7 | 41,2 |
| | R>L | | | | 8,8 | 5,3 | 46,2 | 23,1 |
| | L>R | | | | 8,8 | 6,2 | 54,2 | 20,6 |
| | R>L | | | | 8,8 | 5,2 | 45,8 | 23,3 |
| | L>R | | | | 8,8 | 6,1 | 53,6 | 20,7 |

turpegel ΔL_K berechnet, der vom gemessenen Gesamtpegel subtrahiert wird [103, S. 103]:

$$\Delta L_K = -10 \cdot \lg(10^{-0,1 \cdot (L_G - L_F)} \text{ dB}) \quad (\text{B.7})$$

Das Hintergrundgeräusch wurde 30 s lang aufgezeichnet und der Mittelungspegel über die gesamte Messdauer für jede Oktavmittenfrequenz bestimmt. Die sich

so ergebenden acht gemittelten Oktavschalldruckpegel werden als Fremdpegel vom Gesamtpegel abgezogen und der Korrekturpegel nach Gleichung B.7 berechnet. Abbildung B.2 stellt die Oktavschalldruckpegel des gemessenen Hintergrundgeräusches $O_{n,\text{Hintergrund}}$ sowie die der Vorbeifahrten dar. Für Vorbeifahrtpegel, die im grau hinterlegten Bereich $[O_{n,\text{Hintergrund}}, O_{n,\text{Hintergrund}} + 15 \text{ dB}]$ liegen, muss ein Korrekturpegel berücksichtigt werden. Da die Messungen nachts stattfanden, ist dies lediglich für die Oktavmittenfrequenz von 125 Hz bei zwei Vorbeifahrten der Konfiguration „TaxiBot einzeln“ der Fall. Der Korrekturpegel beträgt hier $\Delta L_K = 0,16 \text{ dB}$ bzw. $\Delta L_K = 0,23 \text{ dB}$. Bei allen anderen Messungen besteht ein ausreichend großer Abstand vom Gesamtpegel zum Fremdpegel, sodass der Einfluss des Fremdpegels vernachlässigbar ist.

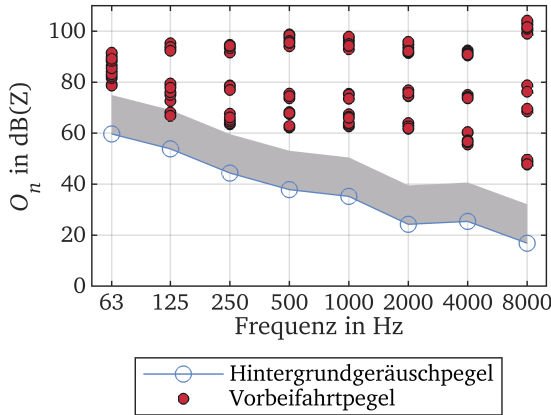


Abbildung B.2.: Gemessene Oktavschalldruckpegel des Hintergrundgeräusches sowie aller Vorbeifahrten. Der grau markierte Bereich kennzeichnet den Bereich $[O_{n,\text{Hintergrund}}, O_{n,\text{Hintergrund}} + 15 \text{ dB}]$ in dem ein Korrekturpegel ΔL_K berücksichtigt werden muss.

Die Berechnung der Oktavschalldruckpegel für eine Bezugsentfernung von $s_{On} = 300 \text{ m}$ (Konfiguration „AETO B737-500“ und „DT (TW an, APU an)“) bzw. $s_{On} = 1 \text{ m}$ (Konfiguration „DT (TW aus, APU an)“ und „TaxiBot einzeln“) erfolgt zunächst über die Bestimmung des Schallleistungspegels $L_{W,n}$ für das n -te Oktavband [17]:

$$L_{W,n} = L_{G,n} - D_s(s) - D_\Omega(s) - D_{L,n}(s) - D_{Z,n}(s) \text{ dB} \quad (\text{B.8})$$

Dabei ist $L_{G,n}$ der gemessene Gesamtpegel, D_s das Abstandsmaß, D_Ω das Raumwinkelmaß, $D_{L,n}$ das Luftabsorptionsmaß und $D_{Z,n}$ das Bodenabsorptionsmaß.

Aus dem Schallleistungspegel wird der Oktavschalldruckpegel O_n für die Bezugsentfernung s_{On} berechnet:

$$O_n(s_{On}) = L_{W,n} + D_s(s_{On}) + D_\Omega(s_{On}) + D_{L,n}(s_{On}) + D_{Z,n}(s_{On}) \text{ dB} \quad (\text{B.9})$$

Wobei für $D_\Omega(s_{On}) = 3 \text{ dB}$ gilt [17].

Durch das Einsetzen von Gleichung B.8 in Gleichung B.9 lassen sich die Maße zusammenfassen. Für das Abstandsmaß D_s gilt:

$$\begin{aligned} D_s &= D_s(s_{On}) - D_s(s) = -10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi s_{On}^2}{s_0^2}\right) + 10 \cdot \lg\left(\frac{4\pi s^2}{s_0^2}\right) \\ &= 10 \cdot \lg\left(\frac{s^2}{s_{On}^2}\right) \text{ dB} \end{aligned} \quad (\text{B.10})$$

mit $s_0 = 1 \text{ m}$.

Für das Raumwinkelmaß D_Ω gilt:

$$D_\Omega = D_\Omega(s_{On}) - D_\Omega(s) = 3 \text{ dB} - 10 \cdot \lg\left(1 + \frac{s^2}{s^2 + 4h_s h_r}\right) \text{ dB} \quad (\text{B.11})$$

Mit h_s der Höhe der Schallquelle über dem Boden in m und h_r der Höhe des Mikrofons über dem Boden in m.

Für das Luftabsorptionsmaß $D_{L,n}$ gilt:

$$\begin{aligned} D_{L,n} &= D_{L,n}(s_{On}) - D_{L,n}(s) = -d_n\left(\frac{s_{On}}{s_0}\right) + d_n\left(\frac{s}{s_0}\right) \\ &= -d_n\left(\frac{s_{On} - s}{s_0}\right) \text{ dB} \end{aligned} \quad (\text{B.12})$$

mit den Absorptionskoeffizienten d_n für das n -te Oktavband. Diese können Anhang C.4, Tabelle C.5, entnommen werden.

Abschließend wird das Bodendämpfungsmaß $D_{Z,n}$ berechnet:

$$\begin{aligned} D_{Z,n} &= D_{Z,n}(s_{On}) - D_{Z,n}(s) \\ &= -D_{Z,0,n}(s_{On}) \cdot \Delta(\alpha)(s_{On}) + D_{Z,0,n}(s) \cdot \Delta(\alpha)(s) \text{ dB} \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

Mit der entfernungsabhängigen Zusatzdämpfung $D_{Z,0,n}$:

$$D_{z,0,n}(s) = \frac{G_n(s/s_1)}{\sqrt{1 + (s/s_1)^2}} \text{ dB} \quad (\text{B.14})$$

Dabei ist G_n die frequenzabhängige asymptotische Pegelminderung bei Boden-Boden Schallausbreitung (siehe Anhang C.4, Tabelle C.5) und s_1 die Normierungsentfernung ($s_1 = 700 \text{ m}$).

Die winkelabhängige Funktion $\Delta(\alpha)$ ist definiert als:

$$\Delta(\alpha) = \begin{cases} 1 - \sin \alpha / \sin 15^\circ & \text{für } 0 \leq \alpha \leq 15^\circ \\ 1 & \text{für } \alpha < 0^\circ \\ 0 & \text{für } \alpha > 15^\circ \end{cases} \quad (\text{B.15})$$

Dabei berechnet sich der Höhenwinkel α mithilfe des Strahlensatzes und unter der Annahme Einfallswinkel = Ausfallswinkel aus:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{h_r + h_s}{r}\right) \quad (\text{B.16})$$

Dabei ist r der horizontale Abstand zwischen der Schallquelle und dem Mikrofon. Abbildung B - 3 verdeutlicht die Geometrie zur Bestimmung des Höhenwinkels α .

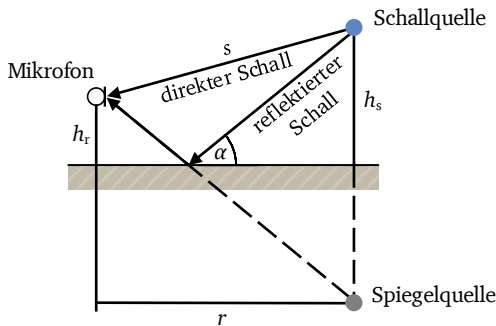


Abbildung B.3.: Geometrie zur Bestimmung des Höhenwinkels α . [Eigene Darstellung nach [17, S. 36]]

B.8 Ermittlung der Messunsicherheit nach GUM:1995

Zur Beschreibung der mit Messvorgängen verbundenen Unsicherheiten hat sich der ISO/IEC Guide 98-3 (GUM:1995) [104] als internationaler Standard durchgesetzt.

Die im Unterabschnitt 4.3.2 und Unterabschnitt 4.3.3 vorgestellten gemessenen Schalldruckpegel werden durch einen Einzahlwert dargestellt. Dieser Einzahlwert beinhaltet jedoch die Effekte einer Reihe von Einflussfaktoren. Der wahre Wert des Schalldruckpegels kann in Anlehnung an DIN 45643 [71, S. 67] folgendermaßen beschrieben werden:

$$L_{p,A,i} = L_{p,A,i,gem} + \delta_{instr} + \delta_v + \delta_{fremd} + \delta_{Rundung} \quad (B.17)$$

Dabei ist

| | |
|--------------------|--|
| $L_{p,A,i}$ | der Schalldruckpegel des betrachteten Geräusches (Schallexpositionspegel, äquivalenter Dauerschalldruckpegel oder maximaler Schalldruckpegel); |
| $L_{p,A,i,gem}$ | der gemessene Schalldruckpegel; |
| δ_{instr} | die Eingangsgröße, die die Unsicherheiten des Messsystems berücksichtigt; |
| δ_v | die Eingangsgröße, die die Unsicherheiten der Vorbeifahrtgeschwindigkeit berücksichtigt; |
| δ_{fremd} | die Eingangsgröße, die die Unsicherheiten von Fremdgeräuschen berücksichtigt; |
| $\delta_{Rundung}$ | die Eingangsgröße, die die Unsicherheiten des Rundens auf eine Nachkommastelle berücksichtigt. |

Zu jeder Eingangsgröße δ gehört eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (normal, Rechteck etc.). Ihr Erwartungswert (Mittelwert) ist der beste Schätzwert der Eingangsgröße und ihre Standardabweichung ist ein als Standardunsicherheit u bezeichnetes Maß der Varianz. Im Allgemeinen wird der Erwartungswert der δ_{instr} -Eingangsgröße mit null eingeschätzt, während der Erwartungswert der Eingangsgröße δ_{fremd} negativ sein kann. Die Eingangsgröße δ_{fremd} kann für die durchgeführten Messungen zu null gesetzt werden, da die gemessenen Schalldruckpegel bei den Vorbeifahrten mindestens 10 dB über dem Hintergrundpegel liegen und der Beitrag des Fremdgeräusches somit vernachlässigbar ist (vgl. Abschnitt B.7).

Die durch das Messsystem bedingte Unsicherheit wird in Anlehnung an [71, S. 68] mindestens durch folgende Einflussfaktoren bestimmt:

$$\begin{aligned}\delta_{\text{instr}} = & \delta_{\text{mic}} + \delta_A + \delta_{\text{lin}} + \delta_U + \delta_p + \delta_T + \delta_{\text{RH}} \\ & + \delta_{\text{Kal,ref}} + \delta_{\text{Kal,op}} + \delta_{\text{Stativ}} + \delta_{\text{mic,s}} \text{ dB}\end{aligned}\quad (\text{B.18})$$

Die Bedeutung der einzelnen Summanden ist in Tabelle B.9 aufgeführt. Zur Abschätzung der Standardunsicherheiten des Mikrofoneinflusses werden die Grenzabweichungen nach DIN EN 61672-1 [22] für einen Schallpegelmesser der Klasse 1 und nach DIN EN 60942 [63] für einen Kalibrator der Klasse 1 verwendet. Zu beachten ist, dass die in DIN 61672-1 [22] angegebenen Grenzabweichungen die größten erweiterten Messunsicherheiten enthalten. Um das Unsicherheitsintervall zu bestimmen, muss die erweiterte Messunsicherheit von den angegebenen Grenzabweichungen subtrahiert werden [22, S. 40].

Die Standardunsicherheit kann durch Abschätzung einer oberen und unteren Grenze (Unsicherheitsintervall) der Eingangsgröße und unter Annahme einer Wahrscheinlichkeitsverteilung ermittelt werden. Bei einer rechteckförmigen Verteilung ist das Eintreten aller möglichen Werte im Intervall von a_u bis a_o gleich wahrscheinlich. Werte außerhalb des Intervalls sind unwahrscheinlich (siehe Abbildung B.4).

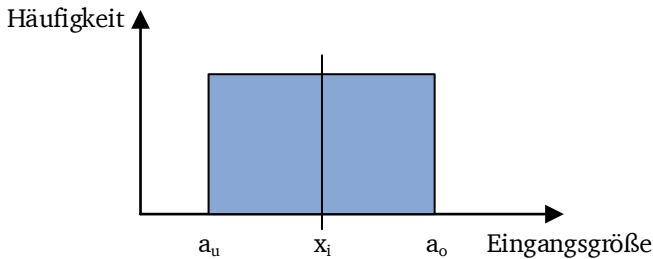


Abbildung B.4.: Rechteckförmige Wahrscheinlichkeitsverteilung. [Eigene Darstellung nach [105, S. 27]]

Die Standardabweichung (Standardunsicherheit) berechnet sich aus [105, S. 28]:

$$u(\delta_i) = \frac{(a_o - a_u)/2}{\sqrt{3}} \quad (\text{B.19})$$

Für die Annahme einer Normalverteilung bei 99 %-igem Vertrauensniveau berechnet sich die Standardunsicherheit mit einem Erweiterungsfaktor k von 2,58:

$$u(\delta_i) = \frac{(a_o - a_u)/2}{2,58} \quad (\text{B.20})$$

Tabelle B.9.: Standardunsicherheiten der die akustischen Messungen beeinflussen-
den Eingangsgrößen nach DIN 45643 [71] und DIN EN ISO 3095 [70].

| Eingangsgröße | Symbol | Unsicherheits- intervall in dB | Verteilung | Divisor | Standard- unsicherheit | |
|---|---------------------------|--|------------|------------|---------------------------|---------------|
| | | | | | Symbol | Wert in dB |
| Einflüsse des Mikrofons (Richtwirkung, Vorverstärker, Windschirm etc.) ¹⁾ für $\theta \leq 90^\circ$ | δ_{mic} | $\pm 1,5$ | Normal | 2,58 | u_{mic} | 0,58 |
| Toleranzen in der A- Frequenzbewertung | δ_A | $\pm 1,0$ | Normal | 2,58 | u_A | 0,39 |
| Toleranzen der Pegellinearität | δ_{lin} | $\pm 0,8$ | Normal | 2,58 | u_{lin} | 0,31 |
| Einfluss der Spannungsversorgung | δ_U | $\pm 0,1$ | Normal | 2,58 | u_U | 0,04 |
| Wirkung des Umgebungsluftdrucks | δ_p | $\pm 0,4$ | Normal | 2,58 | u_p | 0,16 |
| Wirkung der Umgebungstemperatur | δ_T | $\pm 0,5$ | Normal | 2,58 | u_T | 0,19 |
| Wirkung der Luftfeuchtigkeit | δ_{RH} | $\pm 0,5$ | Normal | 2,58 | u_{RH} | 0,19 |
| Toleranzen des Kalibratorpegels unter Bezugsbedingungen | $\delta_{\text{Kal,ref}}$ | $\pm 0,25$ | Normal | 2,58 | $u_{\text{Kal,ref}}$ | 0,10 |
| Toleranzen des Kalibratorpegels unter Betriebsbedingungen | $\delta_{\text{Kal,op}}$ | $\pm 0,25$ | Normal | 2,58 | $u_{\text{Kal,op}}$ | 0,10 |
| Wellenreflexion des Stativs | δ_{Stativ} | $\pm 0,6$ | Rechteck | $\sqrt{3}$ | u_{Stativ} | 0,35 |
| Änderungen des Schalldruckpegels aufgrund von Ungenauigkeiten des Mikrofonabstands ²⁾ (Bereich von $\pm 0,6$ %) | $\delta_{\text{mic,s}}$ | bei einem Mikrofonabstand von ($22,50 \pm 0,15$) m $\pm 0,06$ | Rechteck | $\sqrt{3}$ | $u_{\text{mic,s}}$ | 0,03 |
| Ungenauigkeiten der Vorbeifahrt- geschwindigkeit und des Messgeräts ³⁾ (Bereich von ± 23 %) | δ_V | bei einer Geschw. von ($10 \pm 2,3$) m/s [$-1,1; +0,9$] | Rechteck | $\sqrt{3}$ | u_V | 0,59 |
| Runden auf eine Nachkommastelle | δ_{Rundung} | $\pm 0,05$ | Rechteck | $\sqrt{3}$ | u_{Rundung} | 0,03 |

Die für die einzelnen Eingangsgrößen berechneten Standardunsicherheiten sind in Tabelle B.9 zusammengefasst. Für die Eingangsgrößen δ_{mic} , δ_A , δ_{lin} , δ_U , δ_p , δ_T , δ_{RH} , $\delta_{\text{Kal,ref}}$, $\delta_{\text{Kal,op}}$ wird basierend auf DIN 45643 [71, S. 69] eine Normalverteilung angenommen. Alle anderen Eingangsgrößen wurden aufgrund ihrer Relevanz ergänzt und nach DIN EN ISO 3095 [70, S. 56] eine Rechteckverteilung der Werte angenommen.

Im Folgenden wird erläutert, wie die Unsicherheitsintervalle der Eingangsgrößen δ_{mic} , $\delta_{\text{mic,s}}$ sowie δ_v aus Tabelle B.9 berechnet werden:

1) Der Einfluss der Richtwirkung des Mikrofons auf die Messunsicherheit hängt vom Schalleinfallswinkel θ und der Frequenz ab. Hierbei ist der Schalleinfallswinkel definiert als der Winkel zwischen der Referenzrichtung und einer Geraden zwischen dem akustischen Zentrum einer Schallquelle und dem Mikrofonbezugspunkt (siehe Abbildung B.5). Eine Abschätzung des größtmöglichen Schalleinfallswinkels ergibt unter Berücksichtigung der Messfensterlänge und des Mikrofonabstandes zur Fahrbahnmittellinie $\theta = \arctan(50\text{m}/22,5\text{m}) = 66^\circ$. Die Form des am Mikrofon gemessenen A-bewerteten Terzspektrums bestimmt, welcher Frequenzbereich den vorherrschenden Anteil am Schalldruckpegel liefert und welche Frequenzbänder folglich zur Abschätzung der Unsicherheit zu berücksichtigen sind [71, S. 69]. Wie in Abbildung 4.20 bis Abbildung 4.23 zu sehen, tragen die Schalldruckpegel der Frequenzbänder von 63 Hz bis 1.000 Hz am meisten zum Gesamtschalldruckpegel bei. Nach DIN EN 61672-1 [22, S. 18] liegt demnach die Grenzabweichung für die Richtcharakteristik für $\theta \leq 90^\circ$ bei 1,5 dB (Mikrofon der Klasse 1).

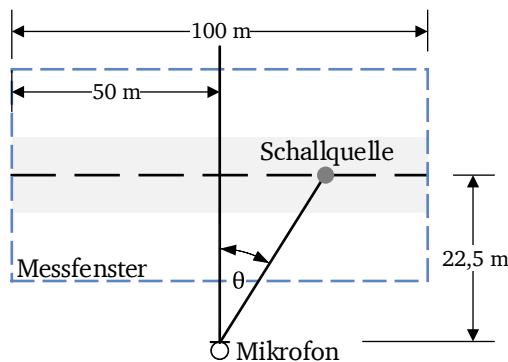


Abbildung B.5.: Definition des Schalleinfallswinkels θ . [Eigene Darstellung nach [22, S. 12]]

2) Der Einfluss auf den gemessenen Schalldruckpegel aufgrund von Ungenauigkeiten des Mikrofonabstands $\bar{\delta}_{\text{mic},s}$ wird folgendermaßen abgeschätzt: Der Abstand des Mikrofons zur Fahrbahnmittellinie soll nach DIN ISO 362-1 [68, S. 21] $(7,5 \pm 0,05) \text{ m}$ betragen. Dies entspricht einer maximal zulässigen Abweichung von 0,6 %. Da der Messabstand aus Sicherheitsgründen 22,5 m betrug, entspricht eine Abweichung von 0,6 % einem Abstand von $(22,5 \pm 0,15) \text{ m}$. Unter Annahme einer Punktschallquelle berechnet sich das Abstandsmaß D_s nach Gleichung B.10 für die obere und untere Intervallgrenze derart:

$$D_{s,\max}(22,5 \text{ m} + 0,15 \text{ m}) = 10 \cdot \lg \left(\frac{4\pi \cdot (22,65 \text{ m})^2}{(1 \text{ m})^2} \right) = 38,09 \text{ dB} \quad (\text{B.21})$$

$$D_{s,\min}(22,5 \text{ m} - 0,15 \text{ m}) = 10 \cdot \lg \left(\frac{4\pi \cdot (22,35 \text{ m})^2}{(1 \text{ m})^2} \right) = 37,98 \text{ dB} \quad (\text{B.22})$$

Zur Berechnung der Standardunsicherheit $u_{\text{mic},s}$ gilt folgender Ansatz:

$$u_{\text{mic},s} = \frac{(D_{s,\max} - D_{s,\min})/2}{\sqrt{3}} = 0,03 \text{ dB} \quad (\text{B.23})$$

3) Die Ungenauigkeit der Vorbeifahrtgeschwindigkeit setzt sich aus der Ungenauigkeit der tatsächlich gefahrenen Geschwindigkeit und der maximalen Messunsicherheit (3 % nach [70, S. 23]) zusammen. Bei den Messungen ergab sich die größte Streuung der Vorbeifahrtgeschwindigkeiten bei der Konfiguration DT (TW an, APU an) mit einem Mittelwert von $\bar{v} = 10,18 \text{ m/s}$ und einer maximalen Abweichung von 20 %. Zusammen mit der Messunsicherheit stellt die prozentuale Abweichung von 23 % eine Abschätzung des Maximums dar. Unter der Annahme einer Vorbeifahrtgeschwindigkeit von 10 m/s ergibt sich das Geschwindigkeitsmaß D_V für das Unsicherheitsintervall nach [17, S. 37]:

$$D_{V,\max}(10 \text{ m/s} + 2,3 \text{ m/s}) = 10 \cdot \lg \left(\frac{12,3 \text{ m/s}}{1 \text{ m/s}} \right) = 10,90 \text{ dB} \quad (\text{B.24})$$

$$D_{V,\min}(10 \text{ m/s} - 2,3 \text{ m/s}) = 10 \cdot \lg \left(\frac{7,7 \text{ m/s}}{1 \text{ m/s}} \right) = 8,87 \text{ dB} \quad (\text{B.25})$$

Für die Standardunsicherheit u_V gilt dann Folgendes:

$$u_V = \frac{(D_{V,\max} - D_{V,\min})/2}{\sqrt{3}} = 0,59 \text{ dB} \quad (\text{B.26})$$

Die kombinierte Standardunsicherheit u_c des gemessenen Schalldruckpegels wird berechnet nach [70, S. 59]:

$$u_c(L_{p,A,i}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial \delta_i} \right)^2 u^2(\delta_i)} \quad (\text{B.27})$$

Unter der Annahme, dass die Eingangsgrößen unkorreliert sind, wird der Sensitivitätsfaktor für alle Beiträge zu $\partial f / \partial \delta_i = 1$. In diesem Fall wird die kombinierte Standardunsicherheit u_c berechnet nach:

$$u_c(L_{p,A,i}) = \sqrt{\sum_{i=1}^N u^2(\delta_i)} \quad (\text{B.28})$$

Aus den in Tabelle B.9 ausgewiesenen Werten für die Standardunsicherheit ergibt sich u_c zu 1,08 dB. Die erweiterte Unsicherheit U wird durch Multiplikation der kombinierten Standardunsicherheit u_c mit einem Erweiterungsfaktor ermittelt [71, S. 72]:

$$U(L_{p,A,i}) = k \cdot u_c(L_{p,A,i}) \quad (\text{B.29})$$

Um ein Vertrauensniveau von annähernd 95 % zu erreichen, wird $k = 2$ gewählt. Damit beträgt die erweiterte Unsicherheit der Messergebnisse $U = 2,16$ dB.

C Anhang zu Kapitel 5

C.1 Beschreibung der Abflug-Rollwege

Tabelle C.1.: Beschreibung der Abflug-Rollwege am Beispiel des Rollwegs D07_P11 am Flughafen Frankfurt.

| Bezeichnung | ID | Flughafen | Art | Runway | DES-Geometrie | | | | Korridorbreite am Ende in m |
|-------------|---------|-----------|--------------|--------|----------------|-----------|-------------|-------------|-----------------------------|
| | | | | | Geradeaus in m | Kurve L/R | Winkel in ° | Radius in m | |
| D07C_P11 | Flg0798 | EDDF | Rollen-Start | 07C | | R | 56 | 100 | 0 |
| | | | | | 70 | | | | 0 |
| | | | | | | R | 80 | 120 | 0 |
| | | | | | 111,5 | | | | 0 |
| | | | | | | R | 44,02 | 120 | 0 |
| | | | | | 70 | | | | 0 |
| | | | | | | L | 5 | 75 | 0 |
| | | | | | 44 | | | | 0 |
| | | | | | | R | 4,97 | 75 | 0 |
| | | | | | 430 | | | | |
| | | | | | | L | 15 | 75 | 0 |
| | | | | | 100 | | | | |
| | | | | | | R | 15 | 75 | 0 |
| | | | | | 15 | | | | 300 |
| | | | | | 270 | | | | 300 |

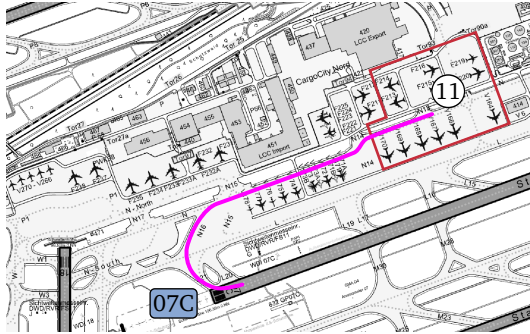


Abbildung C.1.: Abflug-Rollweg D07C_P11 analog zu Tabelle C.1. Der Rollweg wird von der Startbahn 07C bis zum Positionsbereich 11 definiert. [Hintergrundkarte: Fraport Bestandsplan 2014]

C.2 Luftfahrzeuggruppen nach AzB

Tabelle C.2.: Zuordnung von beispielhaften Luftfahrzeugtypen zu Luftfahrzeuggruppen nach AzB [17] (P - Propellerflugzeug, S - Strahlflugzeug). Beispiele aus [9, S. 47].

| Luftfahrzeuggruppe | Luftfahrzeugtyp |
|--------------------|---|
| P 1.3 | DA42, PA-46 |
| P 1.4 | PA-42, Cessna 421 |
| P 2.1 | ATR-42, Dash-8, DO-328 |
| S 5.1 | BAe-146, LJ 60, Citation Jets |
| S 5.2 | B738, A321, A319, B737, A320, B733, E190, B735, A318, B734, B736, B752, B739, MD-90 |
| S 5.3 | MD-82, MD-87, MD-83, Yak-42 |
| S 6.1 | B753, B772, A30B, A333, B77L, A332, B77W, B763, B764, A306, B762, B773, A310 |
| S 6.2 | MD-11, C-17 |
| S 6.3 | A343, A346, A345, A342 |
| S 7 | B744, B743, B742, B74S |
| S 8 | A388 |

C.3 Streckenbelegung und APU-Einsätze

Tabelle C.3.: Streckenbelegung am Beispiel der Rollwege D07_P11 und D07C(L17)_P11 für die 6.v.M. 2014. Da die Startbahn 07C zwei Aufrollpunkte besitzt, wird die Anzahl der Luftfahrzeuge prozentual auf beide Rollwege aufgeteilt.

| Bezeichnung | ID | Flughafen | Art | Runway | Flugzeug- gruppe | Anzahl | | Bewegungen | |
|---------------|---------|-----------|------------------|----------|---------------------|--------|-------|------------|-------|
| | | | | | | Tag | Nacht | Tag | Nacht |
| D07C_P11 | Flg0798 | EDDF | Rollen- Start | 07C | P 2.1 | 0,49 | 0 | 657,15 | 88,66 |
| | | | | | S 5.1 | 2,33 | 0 | | |
| | | | | | S 5.2 | 120,37 | 20,66 | | |
| | | | | | S 6.1 | 243,96 | 32 | | |
| | | | | | S 6.2a | 7 | 17 | | |
| | | | | | S 6.2b | 163 | 18 | | |
| | | | | | S 6.3 | 105 | 0 | | |
| D07C(L17)_P11 | Flg0818 | EDDF | Rollen- Start | 07C(L17) | P 2.1 | 0,51 | 0 | 221,85 | 37,34 |
| | | | | | S 5.1 | 3,67 | 0 | | |
| | | | | | S 5.2 | 217,63 | 37,34 | | |
| | | | | | S 6.1 | 0,04 | 0 | | |
| | | | | | | | | | |

Tabelle C.4.: Auszug der APU-Einsätze je Abstellposition und Luftfahrzeuggruppe für die 6.v. M. 2014 (d - Tag, n - Nacht).

| Abstell- position | S 5.2 | | S 6.1 | | S 6.3 | | S 7b | |
|----------------------|-------|----|-------|---|-------|---|------|---|
| | d | n | d | n | d | n | d | n |
| A1 | 1049 | 44 | | | | | | |
| A11 | 1149 | 48 | | | | | | |
| A13 | 1154 | 55 | | | | | | |
| A14 | 1569 | 60 | | | | | | |
| A15 | 435 | 53 | 72 | | 55 | | 103 | 3 |
| A16 | 1610 | 84 | | | | | | |
| ... | | | | | | | | |

C.4 Sonstige Größen

Tabelle C.5.: Zahlenwerte für die Absorptionskoeffizienten d_n , die asymptotischen Pegelminderungen G_n und die Konstanten A_n für die A-Bewertung der Oktavschalldruckpegel nach [17, S. 36f.].

| n | Oktavmitten- frequenz in Hz | d_n in dB | G_n in dB | A_n in dB |
|-----|-----------------------------------|----------------------|----------------|----------------|
| 1 | 63 | $0,33 \cdot 10^{-3}$ | 5 | -26,2 |
| 2 | 125 | $0,66 \cdot 10^{-3}$ | 7,5 | -16,1 |
| 3 | 250 | $1,3 \cdot 10^{-3}$ | 10 | -8,6 |
| 4 | 500 | $2,3 \cdot 10^{-3}$ | 9 | -3,2 |
| 5 | 1.000 | $4,9 \cdot 10^{-3}$ | 8 | 0 |
| 6 | 2.000 | $10,2 \cdot 10^{-3}$ | 7 | 1,2 |
| 7 | 4.000 | $25,6 \cdot 10^{-3}$ | 6 | 1 |
| 8 | 8.000 | $43,0 \cdot 10^{-3}$ | 5 | -1,1 |

C.5 Dauer des Triebwerkstarts

Tabelle C.6.: Zuordnung der Luftfahrzeuggruppe nach AzB [17] und der Dauer des Triebwerkstarts bzw. der Warmlaufdauer der Triebwerke [4, 106].

| Luftfahrzeuggruppe | Dauer Triebwerkstart in s | Warmlaufdauer der Triebwerke in s |
|--------------------|-----------------------------------|---|
| P 1.3 | 35 | 60 |
| P 1.4 | 35 | 60 |
| P 2.1 | 35 | 60 |
| S 5.1 | 35 | 60 |
| S 5.2 | 106 (gewichteter Mittelwert) | 120 |
| S 5.3 | 90 | 120 |
| S 6.1 | 151 (gewichteter Mittelwert) | 180 |
| S 6.2 | 140 | 180 |
| S 6.3 | 128,6 (gewichteter Mittelwert) | 180 |
| S 7 | 140 (gewichteter Mittelwert) | 180 |
| S 8 | 150 | 180 |

C.6 APU-Oktavschalldruckpegel

Tabelle C.7.: APU-Oktavschalldruckpegel für verschiedene Luftfahrzeuggruppen nach [76]. Die Luftfahrzeugklassen P 1.3 und P 1.4 besitzen keine APU. Für die Luftfahrzeugklasse S 8 sind keine Messwerte verfügbar. Daher werden die Oktavschalldruckpegel aus der AzB [17] (APU-Klasse 2) verwendet.

| Luftfahrzeug- gruppe | APU-Oktavschalldruckpegel in dB | | | | | | | |
|-------------------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 63 Hz | 125 Hz | 250 Hz | 500 Hz | 1.000 Hz | 2.000 Hz | 4.000 Hz | 8.000 Hz |
| P 1.3 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| P 1.4 | – | – | – | – | – | – | – | – |
| P 2.1 | 100,0 | 101,4 | 104,6 | 105,7 | 104,2 | 100,2 | 97,5 | 100,4 |
| S 5.1 | 106,6 | 106,2 | 108,8 | 110,3 | 107,7 | 104,1 | 103,9 | 105,5 |
| S 5.2 | 106,8 | 104,7 | 107,4 | 108,0 | 104,9 | 102,2 | 100,2 | 103,0 |
| S 5.3 | 106,8 | 104,7 | 107,4 | 108,0 | 104,9 | 102,2 | 100,2 | 103,0 |
| S 6.1 | 106,7 | 104,5 | 106,4 | 108,2 | 107,0 | 107,4 | 106,9 | 105,1 |
| S 6.2 | 112,7 | 110,7 | 108,8 | 110,1 | 108,0 | 107,9 | 109,0 | 107,2 |
| S 6.3 | 105,9 | 103,5 | 104,3 | 105,4 | 102,5 | 101,1 | 99,4 | 100,6 |
| S 7 | 113,1 | 111,1 | 115,8 | 110,7 | 107,0 | 102,8 | 100,0 | 100,8 |
| S 8 | 124,0 | 124,0 | 118,0 | 113,0 | 110,0 | 107,0 | 105,0 | 104,0 |

Tabelle C.8.: APU-Höhe der Luftfahrzeuggruppen nach [76].

| Luftfahrzeug- gruppe | P 1.3 | P 1.4 | P 2.1 | S 5.1 | S 5.2 | S 5.3 | S 6.1 | S 6.2 | S 6.3 | S 7 | S 8 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----|-----|
| Höhe der APU in m | – | – | 2,5 | 2,8 | 4,5 | 2,5 | 7,0 | 4,5 | 7,0 | 8,0 | 8,5 |

C.7 Datenaufbereitung der Flugbewegungstabelle

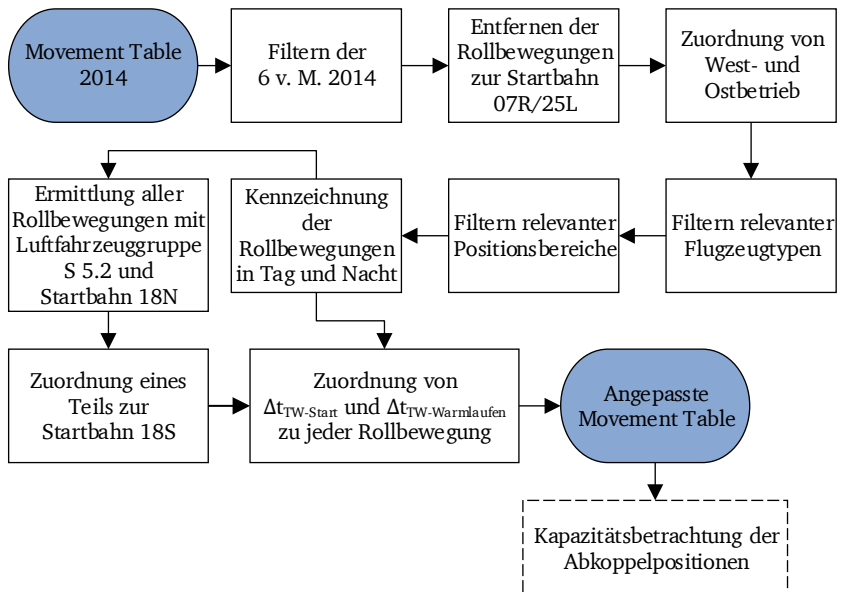


Abbildung C.2.: Ablauf der Datenaufbereitung der Movement Table zur Kapazitätsbetrachtung der Abkoppelpositionen beim DT am Beispiel des Flughafens Frankfurt. [Eigene Darstellung]

C.8 Weitere Ergebnisse der Schallimmissionsberechnung

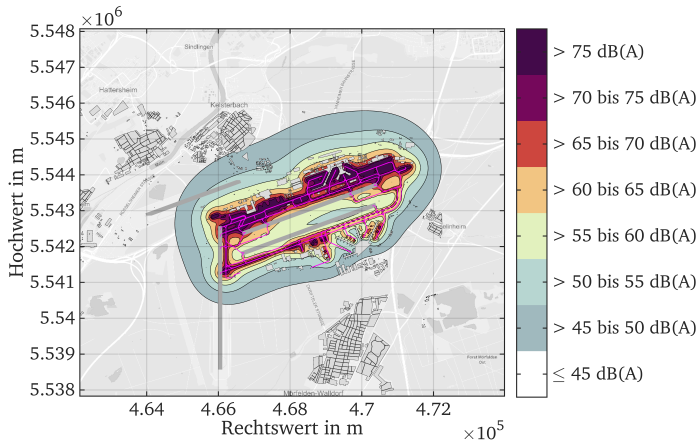


Abbildung C.3.: 24-Stunden-Beurteilungspegel $L_{dn,Boden}$ für das Szenario 1b (DT ohne Kapazitätsbetrachtung und Triebwerkstart während des DT). [Hintergrundkarte © Mapbox]

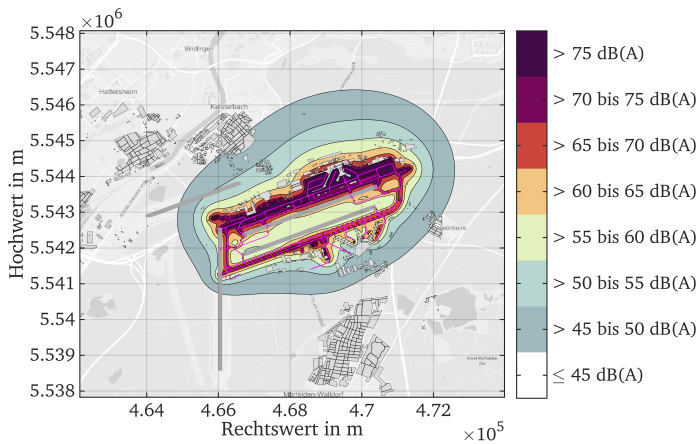


Abbildung C.4.: 24-Stunden-Beurteilungspegel $L_{dn,Boden}$ nach Vorgaben der AzB [17]. [Hintergrundkarte © Mapbox]

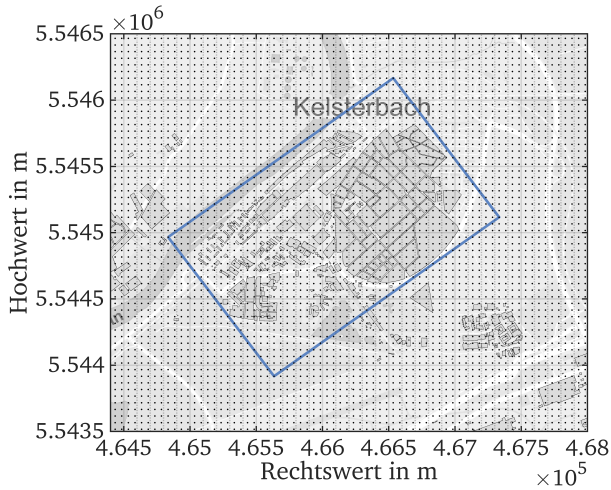


Abbildung C.5.: Rechteckige Abgrenzung des Stadtgebiets Kelsterbach und Darstellung der Immissionspunkte zur Berechnung der durchschnittlichen Pegeländerung. [Hintergrundkarte © Mapbox]